

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Biondić**

**Zagreb, 2012.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

izvr. Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Student:

Luka Biondić

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli pri izradi ovog rada. Prije svega svojem mentoru izvr. prof. dr. sc. Nenadu Bojčetiću , te zaposlenicima firme Izit i firme Topomatika na materijalima, vremenu i nesebičnoj podršci. Također se zahvaljujem svojim roditeljima i djevojci Maji na strpljenju i razumijevanju tijekom razdoblja studiranja.

Luka Biondić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA BIONDIĆ**

Mat. br.: 0035138607

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA UPOTREBLJIVOSTI 3D SKENIRANJA KAO TEHNOLOGIJE POV RATNOG INŽENJERSTVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF USABILITY OF 3D SCAN TECHNOLOGY IN REVERSE ENGINEERING**

Opis zadatka:

Na tržištu postoji veliki broj ispravnih i funkcionalnih dijelova i proizvoda koji su izrađeni prije digitalnog doba, pa stoga za njih ne postoji digitalno pohranjena dokumentacija. Jedna od tehnologija povratnog inženjerstva 3D skeniranje pokazala se kao kvalitetno rješenje za dobivanje računalnog modela proizvoda čija tehnička dokumentacija nije dostupna.

U radu je potrebno:

- Opisati trenutne tehnologije za povratno inženjerstvo.
- Izraditi računalni model postojećeg proizvoda (sunčane naočale) metodom uporabe 3D skeniranja i CAD programske aplikacije Pro/ENGINEER® uz detaljan opis postupka.
- Usporediti dimenzije i odstupanje modela proizvoda dobivenih tehnologijom povratnog inženjerstva s postojećim originalnim proizvodom te opisati na koji način tehnologija povratnog inženjerstva utječe na razlike.

Za izradu modela potrebno je koristiti računalnu aplikaciju Pro/ENGINEER® te alate dostupne u navedenoj aplikaciji.

U radu navesti korištenu literaturu, kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

4. listopada 2012.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Rok predaje rada:

6. prosinca 2012.

Predviđeni datumi obrane:

12. – 14. prosinca 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

## Contents

1. UVOD.....	1
1.1. Povratno inženjerstvo.....	1
1.1.1. Povijest.....	1
1.1.2. Razlozi za procesom povratnog inženjerstva.....	2
1.1.2.1. Ponovna izrada dijelova za koje ne postoji tehnička dokumentacija.....	2
1.1.2.2. Izrada prototipova – izrada CAD modela iz glinenih prototipova ili umjetničkih formi .....	3
1.1.2.3. Izrada biblioteke dijelova vanjskih dobavljača.....	3
1.1.2.4. Rekonstruiranje konkurentskih proizvoda .....	3
1.1.2.5. Medicinska primjena – izrada točnih prilagođenih proteza ili implantata za rekonstrukcijsku kirurgiju, stomatologiju i slično .....	4
1.1.2.6. Konstruiranje novih komponenti na postojećim priključnim mjestima.....	5
1.1.2.7. Arhiviranje – digitalizacija artefakata za dugotrajno čuvanje .....	5
2. OPTIČKI 3D SKENERI.....	6
2.1. Razvoj .....	6
2.1.1. Prva generacija.....	6
2.1.2. Druga generacija .....	7
2.1.3. Treća generacija .....	8
2.1.4. Četvrta generacija .....	9
2.2. Skener ATOS Triple scan .....	10
3. POSTUPAK POVRATNOG INŽENJERSTVA.....	11
3.1. Izrada faceta iz točaka.....	11
3.2. Pregled modela i zatvaranje šupljina. Zaglađivanje modela .....	12
3.3. Polaganje površina i izrada CAD modela .....	13
3.3.1. Exact pristup .....	14
3.3.1.1. NURBS površine - Nastanak i uporabljivost.....	14
3.3.2. Parametarski pristup.....	19
3.3.3. Hibridni pristup .....	21
4. POVRATNO INŽENJERSTVO U INDUSTRIJSKOJ PRAKSI .....	23
4.1. Rekonstrukcija oštećenih ljevačkih kalupa u cilju izrade novih .....	23
4.1.1. Cilj projekta.....	23
4.1.2.1. Optičko skeniranje objekta i obrada Facet-a.....	24
4.1.3. Izrada CAD modela objekta.....	26
4.1.4. Popravak i nadopune CAD modela.....	27
4.1.5. Provjera rezultata .....	30
4.1.6. Zaključak.....	30
4.1.7. Korištena oprema .....	30
4.2. Izrada CAD modela kosti i medicinskih pločica .....	31
4.2.1. Cilj projekta.....	31
4.2.2. Izrada CAD modela kosti - "Exact" pristup.....	31
4.2.3. Izrada CAD modela vijaka - "Parametric" pristup.....	32
4.2.4. Izrada CAD modela pločice - Hibridni pristup.....	32
4.2.5. Finalizacija modela i zaključak.....	33
4.3. Izrada CAD modela sunčanih naočala i razvoj novog modela iz postojećeg .....	34

---

4.3.1.	Cilj projekta.....	34
4.3.2.	Digitalizacija .....	34
4.3.3.	Odabir načina rekonstrukcije .....	35
4.3.4.	Analiza formi i razdvajanje na podejeline .....	35
4.3.5.	Detaljni postupak Izrade CAD modela .....	36
4.3.6.	Izrada ostalih CAD modela i spajanje u cjelinu.....	37
4.3.7.	Analiza odstupanja CAD modela od fizičkog modela.....	38
4.3.8.	Modifikacije i izrada novog modela iz postojećeg .....	40
5.	ZAKLJUČAK.....	41

## POPIS SLIKA

Slika 1	Lijevo T34-proizveden u Rusiji 1940. Desno njemačka poboljšana kopija Panzer V - proizveden 1943. ....	1
Slika 2	Kontaktни mjerni uređaj, popularno nazvan "3-koordinatka" .....	2
Slika 3	Izrada CAD modela umjetničke forme .....	3
Slika 4	Rekonstrukcija konkurentskog proizvoda .....	4
Slika 5	CAD model kosti i pripadajuće pločice .....	5
Slika 6	Skener Comet L3D proizvođača Steinbuchlera koji i danas koristi ovu pomalo zastarjelu tehnologiju .....	7
Slika 7	Skener Atos I proizvođača GOM kao tipični predstavnik ove generacije skenera. ....	8
Slika 8	Atos Triple Scan, GOM-ov mjerni sustav 3. generacije .....	10
Slika 9	Poligonizirana "Facet" geometrija.....	12
Slika 10	Rad u GOM-ovom softveru "GOM-Inspect", pomoću kojeg se vrši uklanjanje neravnina sa facet-a .....	13
Slika 11	Konstrukcija Bezier-ove krivulje 2. reda - krivulja je jednoznačno definirana sa dvije početne točke i dvije kontrolne točke.....	14
Slika 12	Određivanje granica NURBS površina u GeoMagic-u. ....	16
Slika 13	Završna definicija "Patch-eva" ili Nurbs-ova.....	16
Slika 14	Mash generiran između kontrolnih površina unutar NURBS površina .....	17
Slika 15	Završeni CAD model sastavljen od NURBS površina.....	18
Slika 16	Izmjera devijacija STL-a od CAD-a u GeoMagic softveru. ....	19
Slika 17	"Best fit" postavljanje valjaka u Gom Inspect softveru .....	20
Slika 18	Usporedba facet-a i parametarskog CAD modela .....	21
Slika 19	Hibridni pristup rekonstrukciji površina .....	21
Slika 20	Spajanje parametarskog i exact dijela u ProEngimeer-u, posebno se pazi na tangentnost površina, da ne bi došlo do neželjenih rubova ili vrhova .....	22
Slika 21	Fizički modeli koji treba rekonstruirati .....	23
Slika 22	Prikaz skeniranog objekta i pozicija skeniranja .....	24
Slika 23	Pogled jedne od kamera i referentnih kontrolnih točaka.....	24
Slika 24	Popravlak sitnih oštećenja STL file-a.....	25
Slika 25	Popravljen i zaglađen površina, spremna za daljnju obradu.....	26
Slika 26	Konstruiranje NURBS površina u GeoMagic-u.....	26
Slika 27	STP model izrađen u GeoMagic-u .....	27
Slika 28	Spajanje geometrije sa novom razdjelnom površinom.....	28
Slika 29	Završeni model polovine kalupa .....	29
Slika 30	Izrađen model druge polovine kalupa .....	29
Slika 31	Odstupanje STL-a od CAD modela .....	30
Slika 32	Prikaz kontrolnih točaka i mjerna odstupanja .....	31
Slika 33	CAD model ljudske podlaktice napravljen od NURBS površina .....	31
Slika 34	Lijevo je prikaz skenirane geometrije, desno je aproksimacija vijka izrađena Parametric načinom.....	32
Slika 35	CAD model pločice. Jasno su vidljive zone parametarskog i exact pristupa.....	33
Slika 36	Sklop pločice, vijaka i kosti .....	33
Slika 37	Polovina naočala koju je iskorištena za povratno inženjerstvo, pogled iz lijeve i desne kamere .....	34
Slika 38	Prikaz facet-a naočala u GomInspect softveru .....	35

Slika 39	Facet naočala sa karakterističnim ravninama presjeka.....	36
Slika 40	Prikaz faceta, dominantnih presjeka, spline-ova i površine konstruirane iz njih ..	36
Slika 41	Rad sa površinama u ProEngineer softveru .....	37
Slika 42	Konačni model okvira naočala .....	37
Slika 43	CAD modeli noge i stakla naočala .....	38
Slika 44	Finalni model dobiven rekonstrukcijom površina naočala.....	38
Slika 45	Analiza odstupanja CAD modela od fizičkog modela .....	39
Slika 46	Model naočala izrađen prema osnovnom .....	40



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1	Usporedba odstupanja lijeve i desne polovice naočala .....	40
-----------	--	----

## **POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>
mm	milimetar
s	sekunda
kg	kilogram

## SAŽETAK

Povratno inženjerstvo je postupak rekonstrukcije gotovog proizvoda u oblik iz kojega se mogu ponovo proizvesti novi proizvodi temeljeni na postojećim. Razlozi za povratno inženjerstvo su višestruki: ponovna izrada dijelova za koje ne postoji tehnička dokumentacija, izrada CAD modela iz glinenih prototipova ili sličnih umjetničkim formi, izrada biblioteke vanjskih dijelova dobavljača, rekonstruiranje i analiza konkurentskih proizvoda, izrada medicinskih implantata prilagođenih određenom korisniku, konstruiranje novih konponenata na postojećim priključnim mjestima, digitalno arhiviranje.

Pri rekonstrukciji geometrijskih formi i oblika 3D skeneri su od vitalne važnosti. 3D skeneri su se razvijali kroz nekoliko generacija. Suvremeni skeneri sastoje se od dvije kamere i projektora koji projicira obojanu svjetlost. Atos Triple Scan njemačkog proizvođača GOM je primjer skenera ove tehnologije.

Rezultati optičke digitalizacije je oblak točaka u prostoru. Te točke se softverski povezuju u površine i tako nastaje "Facet", geometrijsko tijelo zatvoreno velikim brojem ravnih površina. Facet se može koristiti u nizu CAM procesa ili se može pristupiti izradi CAD modela.

Pri izradi CAD modela mogu se slijediti različiti pristupi. "Exact" pristup ili "kako je napravljeno" se odnosi na rekonstrukciju pomoću NURBS površina. NURBS površine su matematički model koji kompliciranu geometriju dijeli na veći broj manjih površina i svaku matematički definira. Takvim pristupom se rekonstruiraju slobodne umjetničke forme. Parametarskim ili "kako je zamišljeno" pristupom najlakše se rekonstruiraju tehničke forme. Hibridni pristup kombinira prethodna dva pristupa.

Praktična uporaba povratnog inženjerstva opisana je na primjeru rekonstrukcije potrošenog ljevačkog kalupa, te na primjeru rekonstrukcije geometrije medicinske pločice za spajanje dva dijela frakturirane kosti.

Zadatak digitalizacije sunčanih naočala napravljen je skeniranjem sa 3D skenerom Atos Triple Scan, te izradom CAD modela u ProEngineer softveru. Rezultati su obrađeni u GOM Inspect softeru.

## 1. UVOD

### 1.1. Povratno inženjerstvo

Povratno inženjerstvo je proces rekonstrukcije gotovog proizvoda u oblik iz kojeg se mogu izraditi novi dijelovi temeljeni na postojećem proizvodu i alati potrebni za izradu istog. Uvriježeni termin je engleski "Reverse engineering" ili skraćeno RE.

#### 1.1.1. Povijest

Povratno inženjerstvo je proces otkrivanja oblika, strukture, funkcije i principa rada uređaja. Postupak uključuje analiziranje postojećeg uređaja u svrhu izrade novog poboljšanog uređaja, ili funkcionalne kopije. Ovaj postupak se prvotno primjenjivao u vojne svrhe, kako bi se otkrile tehnološke tajne protivnika. Sama vojna tehnologija je strogo čuvana tajna, tako da je jedina mogućnost otkrivanja povratno inženjerstvo protivničkih zarobljenih ili uništenih komada opreme (slika1) .

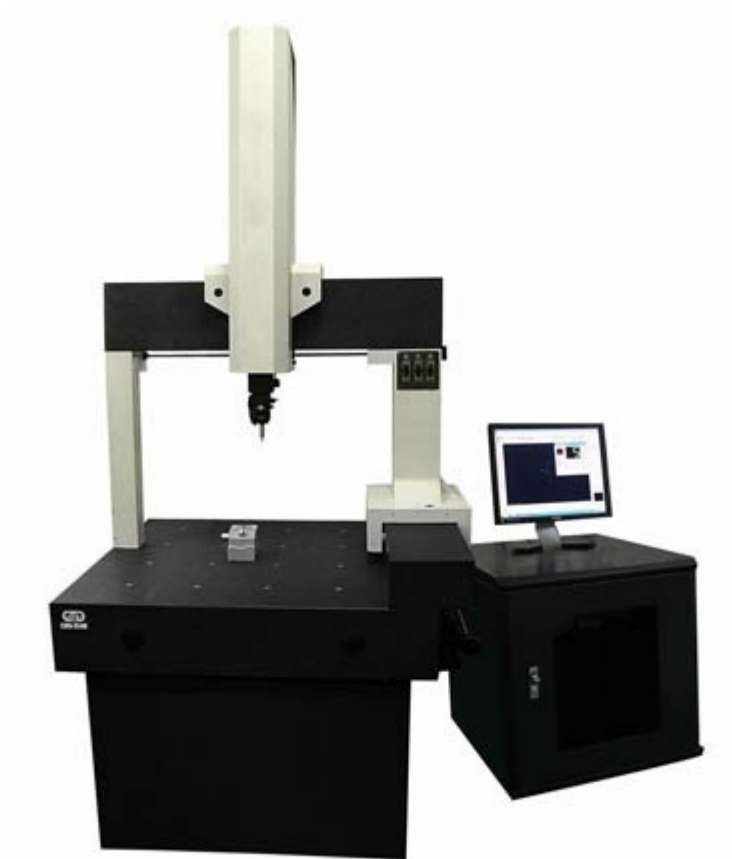


**Slika 1 Lijevo T34-proizveden u Rusiji 1940. Desno njemačka poboljšana kopija Panzer V - proizveden 1943.**

U doba industrijske revolucije civilna uporaba povratnog inženjerstva dolazi do izražaja kroz kopiranje i poboljšavanje konkurentnog proizvoda.

U ranim danima ove djelatnosti, proces se najvećim dijelom odnosio na otkrivanje principa rada tehnologije. Analiza samog oblika proizvoda bila je prilično jednostavna, jer su proizvodi predračunalne ere bili relativno čistih i jednostavnih oblika. Međutim razvojem računala i pojavom CAD-a većinu slobodnih geometrijskih formi nije više bilo lako analizirati. U tu svrhu razvijeno je područje digitalizacije oblika.

Prvi uređaji za digitalizaciju su bili kontaktni tj. dodirni (slika2). Iako vrlo velike preciznosti, problemi su im komplicirana uporaba te vrlo polagan proces mjerenja. Osim toga objekti izrazito male tvrdoće su skoro nemjerljivi, jer se kontaktom sa površinom objekta javljaju deformacije koje jako doprinose mjernoj grešci.



**Slika 2    Kontaktni mjerni uređaj, popularno nazvan "3-koordinatka"**

Slijedeća generacija uređaja su 3D skeneri tj. optički uređaji za digitalizaciju oblika. Njihovim razvojem povratno inženjerstvo oblika je postalo dostupno široj strojarskoj industriji.

### **1.1.2.    Razlozi za procesom povratnog inženjerstva**

#### **1.1.2.1.    Ponovna izrada dijelova za koje ne postoji tehnička dokumentacija**

U suvremenom procesu proizvodnje CNC proizvodnja je postala standard bez kojeg nijedna moderna firma ne radi. Međutim na tržištu postoji još veliki broj ispravnih i funkcionalnih dijelova i proizvoda koji su izrađeni prije digitalnog doba, pa stoga za njih ne postoji digitalno pohranjena dokumentacija. Pošto je za CAM proizvodnju potreban CAD model, takvi proizvodi se ne mogu replicirati bez povratnog inženjerstva.

U procesu digitalizacije takvi predmeti se mogu dodatno poboljšati ili im se može dodati još koja primjena bez da se naruši postojeća funkcionalnost proizvoda.

### **1.1.2.2. Izrada prototipova – izrada CAD modela iz glinenih prototipova ili umjetničkih formi**



**Slika 3 Izrada CAD modela umjetničke forme**

Pošto su umjetničke forme i danas najčešće izrađene rukom umjetnika, umnožavanje i serijska proizvodnja takve forme zahtijeva povratno inženjerstvo.

Umjetničke forme najčešće ne poštuju geometrijske pravilnosti, te je crtanje standardnim CAD alatima neproduktivno. Takvim formama se pristupa postupkom rekonstrukcije "AS IS", što znači da se geometrija ne mijenja i ne poboljšava, nego se nastoji velikim brojem manjih površina dobiti što vjernija kopija modela.

Umnožavanje umjetničkih formi obično podrazumijeva izradu alata ili kalupa kojim će se masovno proizvoditi komad. Pri tome treba obratiti pažnju različite tehnološke zahtjeve kao što je

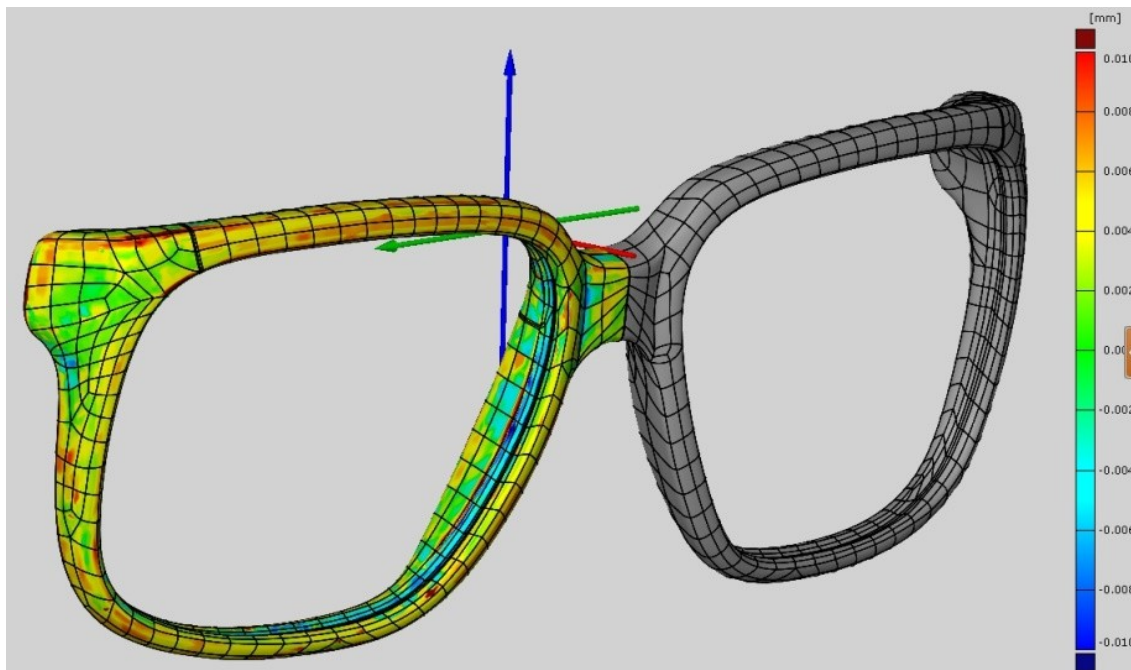
pravilan odabir kutova za vađenje modela iz kalupa.

### **1.1.2.3. Izrada biblioteke dijelova vanjskih dobavljača**

Ponekad se koriste dijelovi od vanjskih dobavljača koji nemaju CAD modele svojih proizvoda. Ako je u firmi uhodan proces RE često je brže i jednostavnije rekonstruirati proizvod nego tražiti dobavljača CAD dokumentaciju. Takvi digitalizirani oblici se lako koriste za daljnje planiranje industrijskog postrojenja ili sličnu uporabu.

### **1.1.2.4. Rekonstruiranje konkurentskih proizvoda**

Najbolji način za procjenu konkurentskog proizvoda je da ga se digitalizira te se uspoređi sa vlastitim proizvodom. Analizom odstupanja i analizom uporabljivosti dobivamo nezamjenjive podatke koji nam trebaju za konstrukciju poboljšanog vlastitog proizvoda (Slika 4).



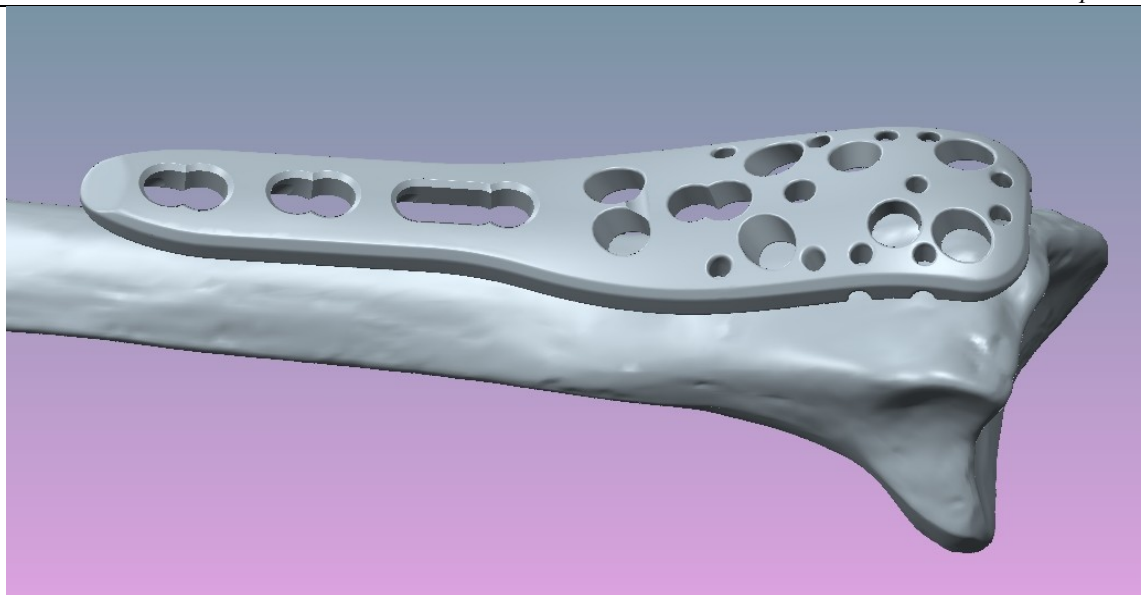
**Slika 4    Rekonstrukcija konkurentskog proizvoda**

#### **1.1.2.5.    Medicinska primjena – izrada točnih prilagođenih proteza ili implantata za rekonstrukcijsku kirurgiju, stomatologiju i slično**

Pomoću postupaka 3D skeniranja i 3D printanja moguće je izraditi medicinske implantate koji idealno pašu jednom korisniku. Problem je često kako napraviti geometrijski oblik koji prati prirodni oblik kosti, čašice zglobe ili nekog drugog dijela tijela a da ne smeta funkcijama organa ili cijelog organizma. Zbog toga je prvo potrebno skenirati kost, napraviti CAD model, te potom po obliku kosti napraviti pločice ili vijke koje ćemo koristiti (Slika 5).

U rekonstrukcijskoj kirurgiji se koristi povratno inženjerstvo na način da bi se dijagnosticirao obim fizičkog oštećenja, te se smislio najbolji oblik i način prihvata implantata.

U stomatologiji se koristi mali oralni skener koji skenira pacijentovo zubalo , te se pomoću tog skena mogu izraditi prilagođene zubne proteze, kapice zuba ili pak cijeli umjetni zubi.



**Slika 5 CAD model kosti i pripadajuće pločice**

Umjetne krunice zubala se mogu isprintati na 3D printerima koji rade sa metalom. Takvi 3D printeri zbog svoje visoke cijene još nisu pristupačni većini tvrtki, pa tako u Hrvatskoj trenutačno ne postoji niti jedan.

#### **1.1.2.6. Konstruiranje novih komponenti na postojećim priključnim mjestima**

Ako razvijamo novi dio koji moramo prihvatiti na postojeće priključno mjesto, povratnim inženjerstvom možemo dobiti najtočniji detalj priključnog mjesta.

#### **1.1.2.7. Arhiviranje – digitalizacija artefakata za dugotrajno čuvanje**

Budućnost arhiviranja i pohrane dokumentacije je u digitalnom obliku. Osim digitalnih crteža dijelova, sve veću važnost imaju i digitalno pohranjeni CAD modeli raznih dijelova.



## 2. OPTIČKI 3D SKENERI

### 2.1. Razvoj

Paralelno sa jačim razvojem računalnih tehnologija, pojavili su se i 3D optički skeneri. Razvoj je tekao u nekoliko faza:

- Prva generacija sa jednim projektorom i jednom kamerom
- Druga generacija sa dvije kamere i jednim projektorom
- Treća generacija sa kodiranim svjetlom u dvije osi
- Četvrta generacija sa četiri kamere i samokalibracijom

#### 2.1.1. Prva generacija

Skener se sastojao od jedne kamere i jednog projektora (Slika 6). Uloga projektora je da projicira svjetlosni uzorak na mjerni predmet, pomoću kojega kamera može jednoznačno definirati položaj mjerne točke na površini predmeta. Svjetlosni uzorak je polje svijetlih i tamnih pruga koje naliježu na mjernu površinu, čiji je cilj da dobijemo različitu osvijetljenost mjernih točaka predmeta. Položaj pojedine mjerne točke se određuje postupkom triangulacije distorziranih svjetlosnih pruga na površini objekta. Međusobni položaj kamere i projektora morao je biti poznat i jednoznačan. Kako zbog mehaničkih i termodinamičkih vanjskih utjecaja često dolazi do greške unutar sustava, isti se mora svako malo kalibrirati. Kalibracija se obično obavlja na specijalnom kalibracijskom objektu za koji se pretpostavlja da ima apsolutnu krutost.



**Slika 6 Skener Comet L3D proizvođača Steinbuchlera koji i danas koristi ovu pomalo zastarjelu tehnologiju**

Nedostatak ove prve generacije skenera je to što se orijentacija kamera-projektor jednom kalibrirana nije smjela promijeniti odnosno kamera je bila fiksna, a objekt se rotirao tijekom mjernog postupka. To je prouzročilo razumljive probleme jer veliki broj objekata nepraktičan za manipulaciju ispred kamera zbog velikih gabarita

### **2.1.2. Druga generacija**

Nastala je logičnim proširenjem sustava u vidu dodavanje druge kamere. Takav se sustav sastojao od dvije kamere i projektor koji je obično bio smješten između kamera (Slika 7). Kako svaka kamera može odrediti dvije koordinate mjerne točke, ovaj sustav ukupno je osiguravao četiri koordinate, dok su za određivanje položaja točke u prostoru potrebne tri. Zbog toga više nije bilo potrebno kalibrirati kamere i projektor nego samo međusobni položaj kamera. Sustav određuje položaj referentne točke na taj način da traži točku sjecišta imaginarne zrake iz jedne kamere prema mornoj točki s imaginarnom zrakom iz druge kamere prema istoj točki. Za to je potrebno imati jednoznačnu epipolarnu ravninu, koji definiraju tri točke: dva centra objektiva kamere i mjerna točka. Epipolarna ravnina dobiva se kalibracijom sustava.



**Slika 7 Skener Atos I proizvođača GOM kao tipični predstavnik ove generacije skenera**

Za mjerenja sustavima prve i druge generacije kalibracijski uvjeti nisu smjeli biti promijenjeni u toku mjerenja jer je to rezultiralo greškama i neuspjelim mjerenjima. Sustavi druge generacije imali su mogućnost pomicanja oko mjernog objekta. Pošto se mjerenja često obavljaju u uvjetima proizvodne hale, vibracije, toplinske distorzije i samo prenošenje sustava lako je moglo dekalibrirati sustav. Toplinske distorzije u nekim su sustavima bile rješavane tako da sami sustav ima u sebi ventilatorsko hlađenje kamera i projektora. Međutim time se u sam sustav dodavao izvor vibracija koji bi u slučaju da je ležaj ventilatora potrošen uzrokovao znatnu grešku mjerenja.

### **2.1.3. Treća generacija**

U slijedećoj generaciji uređaja uvedeno je to da se kodirano svjetlo projicira u dvije okomite osi (Slika 8). Svaka mjerna točka digitalizirana je s vodoravnim uzorkom, pa potom s okomitim uzorkom. Vodoravni uzorak zapravo eliminira potrebu za konstruiranjem epipolarne ravnine. Ovakav sustav nam daje mogućnost promijene kalibracijskim parametara tijekom procesa skeniranja. Time dolazi do pojave "samokalibriranja sustava". Ova generacija skenera je danas u širokoj uporabi, pa će ih se detaljnije opisati u slijedećim poglavljima.

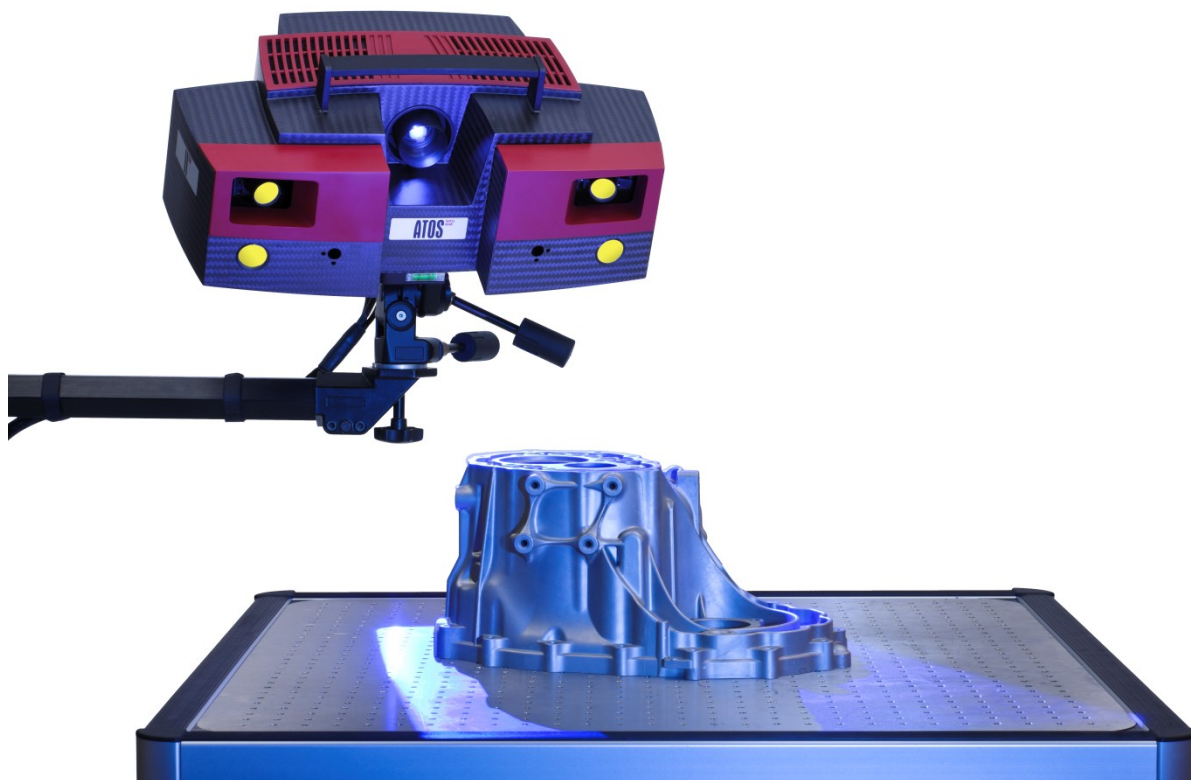
Svaki sustav do sada, mjerenja je obavljao jednim "mjernim kalibrom" kojeg definira objektiv kamere. Kada se javi potreba mjerenja predmeta većih dimenzija od mjernog kalibra, zamijeni se objektiv kamere sa širokokutnim objektivom i tako dobije veći mjerni volumen.

#### **2.1.4. Četvrta generacija**

Četvrta generacija sustava je u razvoju, a poboljšanje u odnosu na treću je dodavanje još dvije mjerne kamere čime bi se postiglo automatsko prilagođavanje mjernog volumena volumenu objekta. Ovi novi sustavi još su u eksperimentalnoj fazi, te im je princip rada uglavnom zaštićen industrijskom tajnom.

## 2.2. Skener ATOS Triple scan

STOS Triple Scan uređaj spada u skenere treće generacije te je jedan od najboljih postojećih industrijskih skenera. Sastoji se od dvije 8 Mpix kamere i projektorom plavog svijetla koji se nalazi između njih. Plavi dio spektra se koristi kako bi se skeniranje bez problema odvijalo po danu tj. da dnevna svjetlost ne ometa kamere.



**Slika 8 Atos Triple Scan, GOM-ov mjerni sustav 3. generacije**

Sustav je prilagođen za 10 različitih mjernih volumena koji su dimenzija od najmanjeg 38 x 29 x 15 mm, do najvećeg od 1500 x 1130 x 1130 mm. Mjerna nesigurnost ovisi mjernom volumenu, a za mjerni volumen "srednjeg ranga" 320 iznosi oko 0.015 mm.

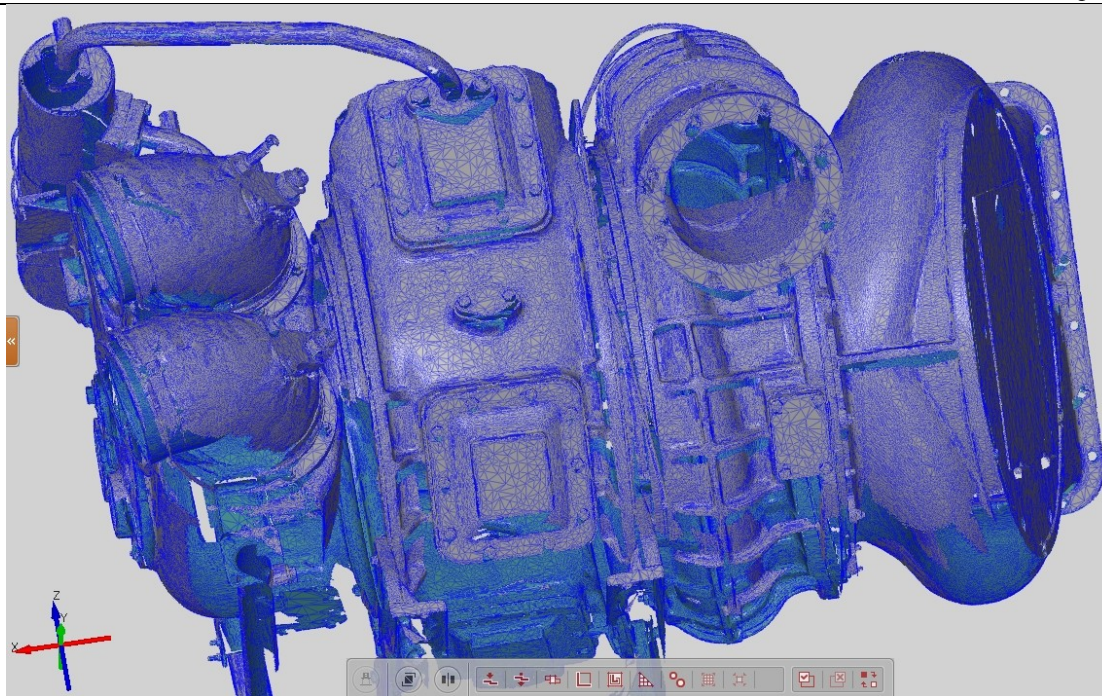
Sustav je postavljen na stalku na kotačima, pa se pomicanjem skenera mogu digitalizirati objekti znatno veći od mjernog volumena. Svaki sken se slaže sa prethodnim pomoću "best fit" metode tj. slike se moraju preklapati da bi mogli dobiti jedinstveni sken.

### 3. POSTUPAK POVRATNOG INŽENJERSTVA

Rezultat digitalizacije objekta pomoću 3D skenera je oblak točaka smještenih u prostoru. Prvi korak prema izradi računalnog modela je izrada Facet-a.

#### 3.1. Izrada faceta iz točaka

"Facet" ili "polihedron" je pojam koji označava geometrijsko tijelo koje je omeđeno ravnim plohami. Pošto je ravna ploha jednoznačno definirana sa tri točke, "facet" nastaje tako da se tri međusobno najbliže točke spoje u trokute na površini objekta (Slika 9). Veličina trokuta određena je brojem točaka zadanog objekta. Sam proces izrade facet-a se obično vrši automatski pomoću software-a koji pripada 3D skeneru. Ovakvi faceti su obično nesavršeni, obiluju neodređenim područjima ili greškama koje nastaju zbog nesavršenosti mjernog objekta. Ukoliko obadvije kamere nisu vidjele točku ta točka neće postojati na STL-u. U praksi se zbog toga često javljaju rupe i pukotine u udubinama i procijepima. Također ako je dio objekta prljav ili zamašćen, na tome mjestu će biti ili neodređena raspucana geometrija ili skeniran sloj masti koji nam daje lažnu površinu. Zbog tih razloga se pristupa popravljaju i ravnanju takvih faceta.



**Slika 9 Poligonizirana "Facet" geometrija**

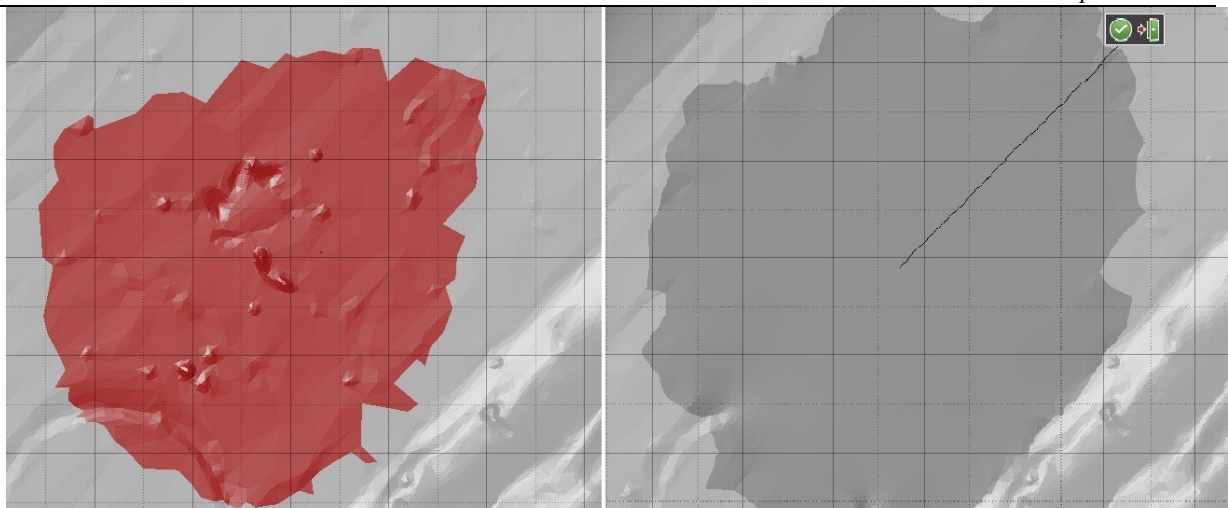
### **3.2. Pregled modela i zatvaranje šupljina. Zaglađivanje modela**

Ponekada su objekti fizički prljavi, masni ili hrđavi uslijed čega se na skenu pojavi veliki broj točaka bliskih u sve tri dimenzije. U tom slučaju se mogu javiti greške pri automatskom generiranju površina, te trokuti ne zatvore određeni volumen. Takva je područja potrebno provjeriti te određenim alatima za modifikaciju faceta, zagladiti, popraviti ili rekonstruirati traženu geometriju.

Za rad sa facet-ima GOM je razvio softver GOM Inspect koji služi upravo za rad sa facet-ima. Osim već navedenih mogućnosti, program nudi i provjeru odstupanja završene CAD geometrije od Facet-a. Pri tome se može dobiti odstupanje svake točke, te se na taj način najlakše provjeri dobiveni CAD model.

Površina objekta se može zagladiti automatski ako odredimo najveća dopuštena odstupanja između susjednih trokuta, te na taj način eliminiramo grbe i rupice i dobijemo glatku površinu (Slika 10).





**Slika 10 Rad u GOM-ovom softveru "GOM-Inspect", pomoću kojeg se vrši uklanjanje neravnina sa facet-a**

Ovako popravljani i rekonstruirani facet možemo koristiti u cijelom nizu strojarskih postupaka. Većina CAM strojeva može obrađivati materijal samo sa facetom kao ulaznom veličinom. 3D printeri isto koriste facet kao ulazni podatak.

Nedostatak faceta je što mu geometriju nije moguće popravljati ili nadopunjavati, pa je to tzv. "Mrtva geometrija". Pošto je facet tijelo ravnih površina, te površine moraju biti izrazito male, da geometrija ne bi bila znatnije narušena i da se ne vide oštri bridovi. To sa sobom nosi neminovno povećanje datoteka do veličina koje nisu praktične. Zbog prirode geometrije, Facet iako ima zatvoreni volumen, ne nosi podatke o površinama tj. normale površine. Taj podatak je koristan ako ćemo predmet glodati na 5-osnoj glodalici, jer ona svakoj površini prilazi sa svrdlom iz smjera normale površine.

Još veći nedostatak facet-a je da matematika kojom je napravljen nije kompatibilna sa matematikom CAD modela. Ako bi željeli mijenjati ili dodavati geometriju na facet, to nismo u mogućnosti napraviti klasičnim CAD alatima. Kako fizičkih predmeta odstupa tolerancijama od svojeg zamišljenog oblika, ili su jednostavno oštećeni, te nam se takve nesavršenosti prenose i na naš digitalizirani model. Da bismo takve nedostatke popravili, pristupamo izradi CAD modela iz faceta.

### **3.3. Polaganje površina i izrada CAD modela**

Izradi CAD modela možemo pristupiti na dva načina ovisno o rezultatima koje želimo dobiti i prirodi modela.



Sve organske modele i umjetničke forme koji ne slijede geometrijske zakonitosti rekonstruiramo "Kako je izrađeno" ili "Exact" pristupom.

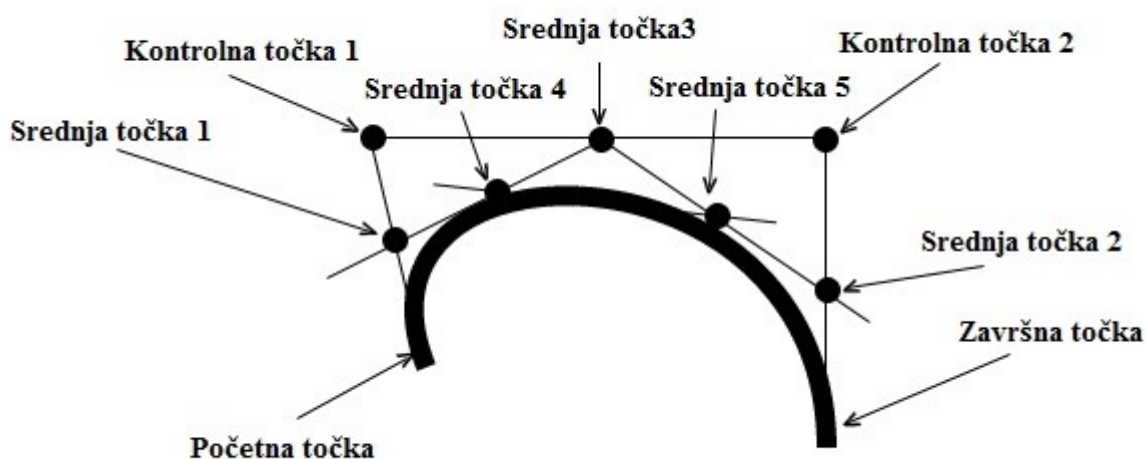
Drugi pristup je "Kako je zamišljeno" ili "Parametric" pristupom.

### 3.3.1. Exact pristup

Organske modele i modele umjetničke forme često je vrlo teško geometrijski opisati. Takvom problemu pristupamo tako da model dijelimo na veliki broj manjih NURBS površina.

#### 3.3.1.1. NURBS površine - Nastanak i uporabljivost

NURBS (Non-uniform rational basis spline) je matematički model na koji se koristi pri računalnom generiranju računalnih površina i spline-ova. Model je razvijen 1950-ih da bi se precizno matematički opisale slobodne površine kao npr. trupovi brodova ili avionska krila. Predvodnici ovog razvoja su bili Pierre Bezier i Paul de Casteljau. Bezier je razvio krivulje koje ovise kontrolnim točkama koje ne leže na samim krivuljama. Te krivulje se i danas zovu Bezier-ove krivulje.



**Slika 11** Konstrukcija Bezier-ove krivulje 2. reda - krivulja je jednoznačno definirana sa dvije početne točke i dvije kontrolne točke.

Bezierove krivulje sadrže više uvjeta kontinuiteta:

- $G_1$  - Početne i završne točke. Služe za spajanje susjednih NURBS-ova.

- $G_2$  - Vektori završne i početne točke susjednih NURBS-ova se moraju poklapati tj. funkcija mora biti derivabilna u završnim točkama da bi se dobio glatki prijelaz između NURBS-ova. Ukoliko ovaj uvjet nije zadovoljen dobiti ćemo oštar rub, što isto može biti korisno ukoliko objekt treba imati oštar rub.
- $G_2$  - Završni vektori moraju biti iste dužine tj. druga derivacija krivulje mora biti konstantna. To nam daje kontinuirani prijelaz između NURBS-ova, bez iznenadnog povećanja zakrivljenosti.

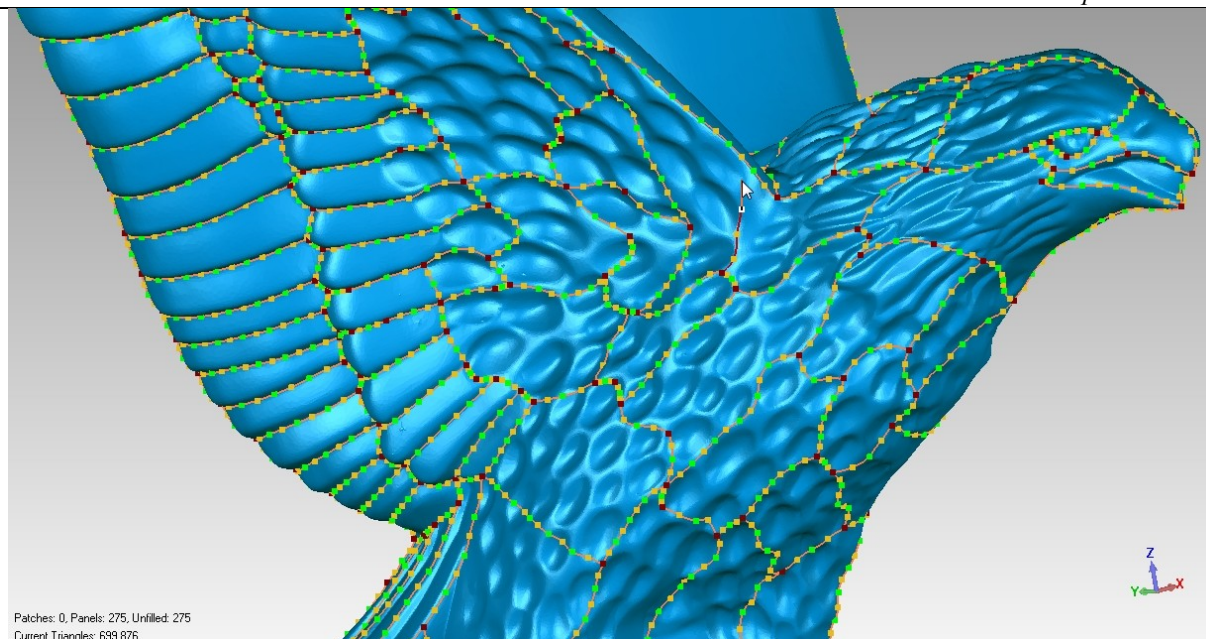
Bezierove krivulje  $n$ -tog reda sastoje se od dva čvora i  $n$  kontrolnih točaka. Iz kontrolnih točaka se konstruiraju točke kroz koje prolazi krivulja (Slika 11). Jedan NURBS je omeđen sa četiri Bezierove krivulje, po dvije u svakom smjeru. Ti smjerovi se uobičajeno označavaju sa  $u$  i  $v$ . Bezierov prikaz je vrlo koristan za pretvaranje STL geometrije u CAD geometriju zbog značajke STL-a da sadrži veliki broj točaka koje su rubne točke modela i ako bi između tih točaka povlačili polinome, CAD model bi zatvorio osjetno veći volumen nego STL file, a time bi i fizički model nerealno narastao. Dakle poanta je da se točke iz stl-a koriste kao kontrolne točke u Bezierovom modelu, te na taj način zatvaraju realniji volumen. Možda je korisno reći da ne postoji "krivi" i "pravi" model, nego postoji odstupanje mjerne pogreške, koju ocjenjujemo zadovoljavajućom ili nezadovoljavajućom u ovisnosti o razlogu rekonstrukcije.

NURBS površine se koriste u CAD geometriji iz slijedećih razloga:

- Pošto su vektorski zabilježene, neosjetljive su na rotaciju i translaciju modela
- kompatibilne su sa standardnim CAD modelima, te ih stoga možemo obrađivati i nadograđivati
- Pošto niz točaka zamjenjuju sa jednom krivuljom i dvije točke, nude znatnu uštedu sa strane radne memorije i pohrane podataka.

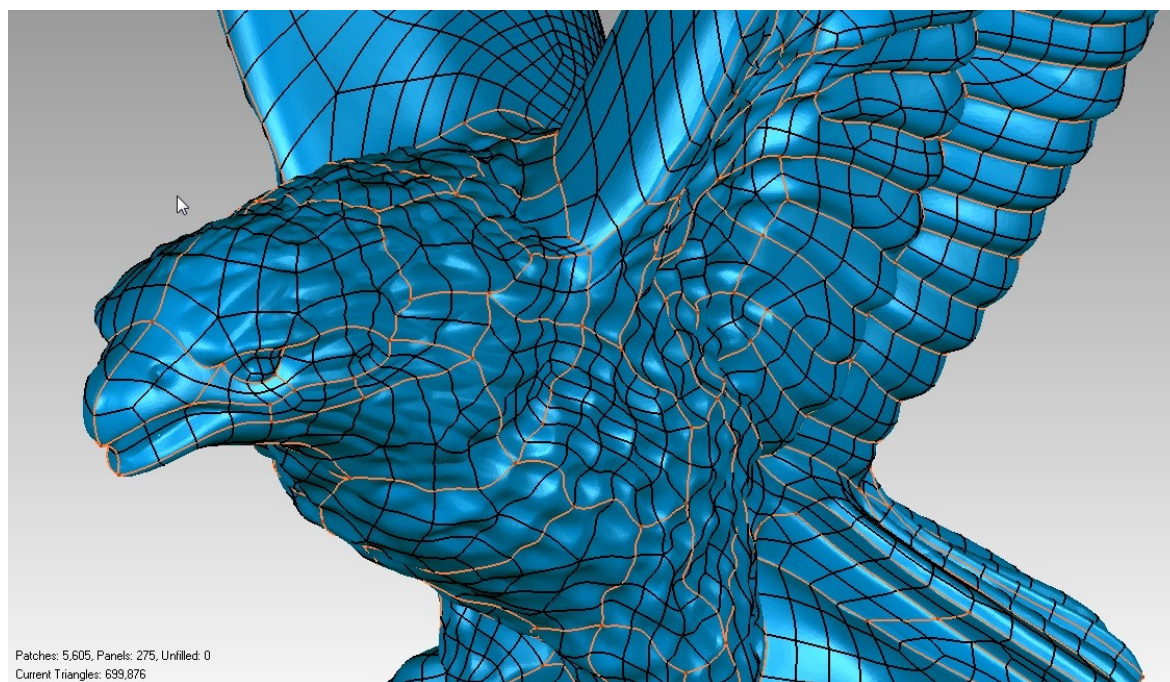
Jedan on najboljih računalnih programa za pretvorbu STL geometrije u NURBS geometriju je GeoMagic Studio. Ovaj softver ima tri radna moda: upravljanje poligoniziranom geometrijom, parametarski pristup i exact pristup.

Dok parametarski pristup vrlo dobro mogu odraditi i klasični CAD programi kao ProEngineer ili Catia, exact modul GeoMagica koji radi sa NURBS-ovima je nezamjenjiv u povratnom inženjerstvu.



**Slika 12** Određivanje granica NURBS površina u GeoMagic-u.

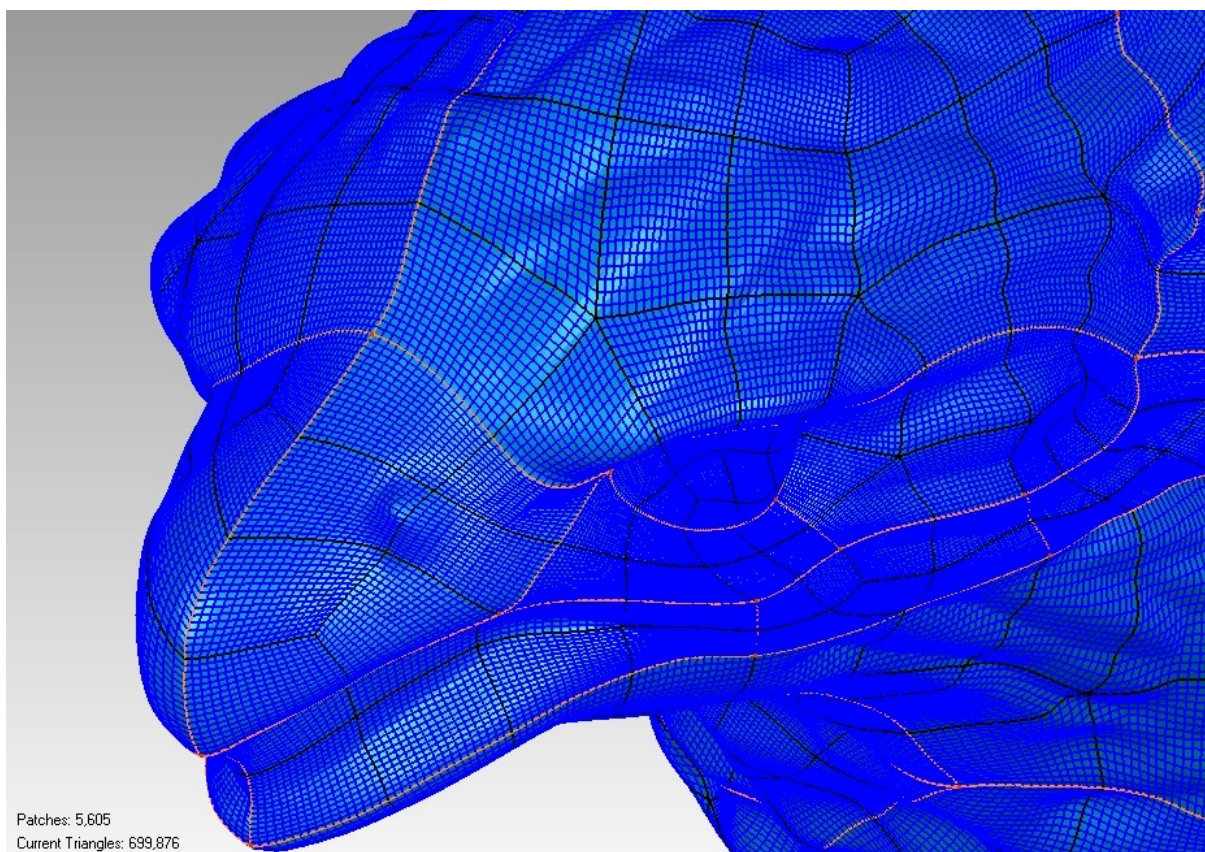
Na slici 21 vidi se kako operater određuje granice NURBS površina. Zatim se definira broj površina. Ukoliko je taj broj veći od broja koje je ručno odredio operater, softver će sam podijeliti površine na veći broj NURBS-ova (Slika 13).



**Slika 13** Završna definicija "Patch-eva" ili Nurbs-ova



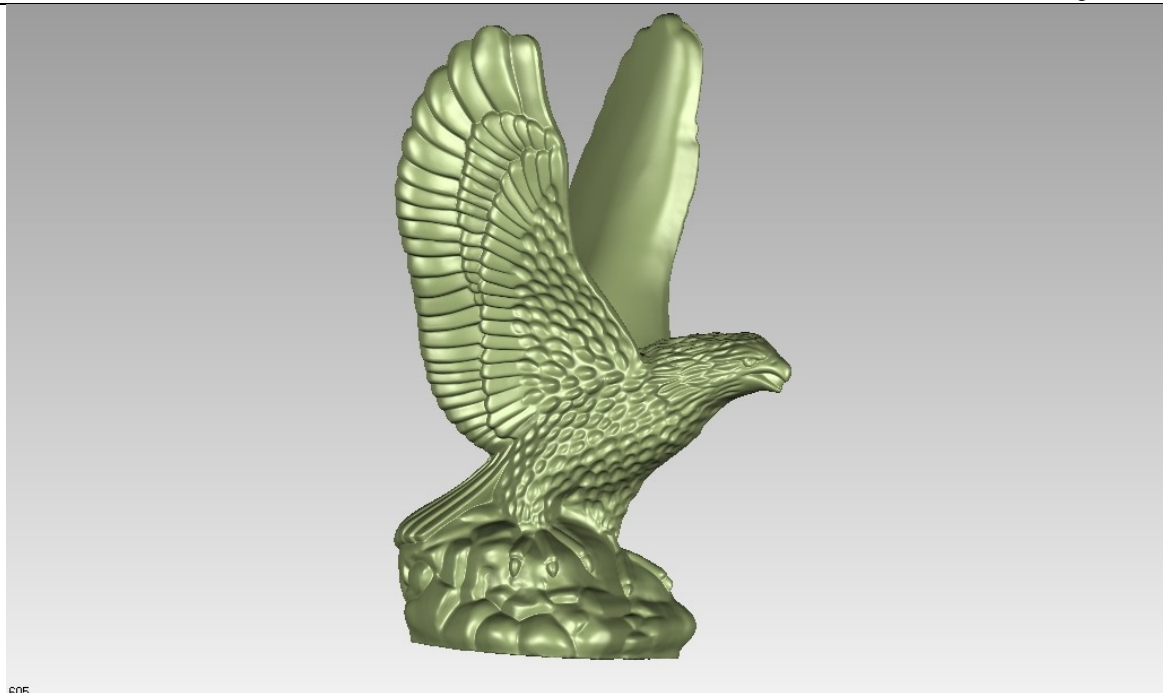
Broj NURBS površina operator ocjenjuje prema tome koliko zahtijevana geometrija mora biti točna u odnosu na original. Također se mora uzeti u obzir da završene datoteke ne budu prevelike i hardverski zahtjevne. Ako je slijedeći korak poboljšavanje CAD modela u klasičnim softverima tipa ProEngineer i CATIA, NURBS površine ne smiju biti prebrojne, jer često dolazi do "raspucavanja" geometrije. Raspucana geometrija se javlja ako je red polinoma NURBS-a veći nego red koji podržava softver u kojem radimo. Zbog toga je u GeoMagic-u operateru dana sloboda da odluči koliko kontrolnih točaka iz STL-a se želi upotrijebiti po svakoj Bezier-ovoj krivulji.



**Slika 14 Mash generiran između kontrolnih površina unutar NURBS površina**

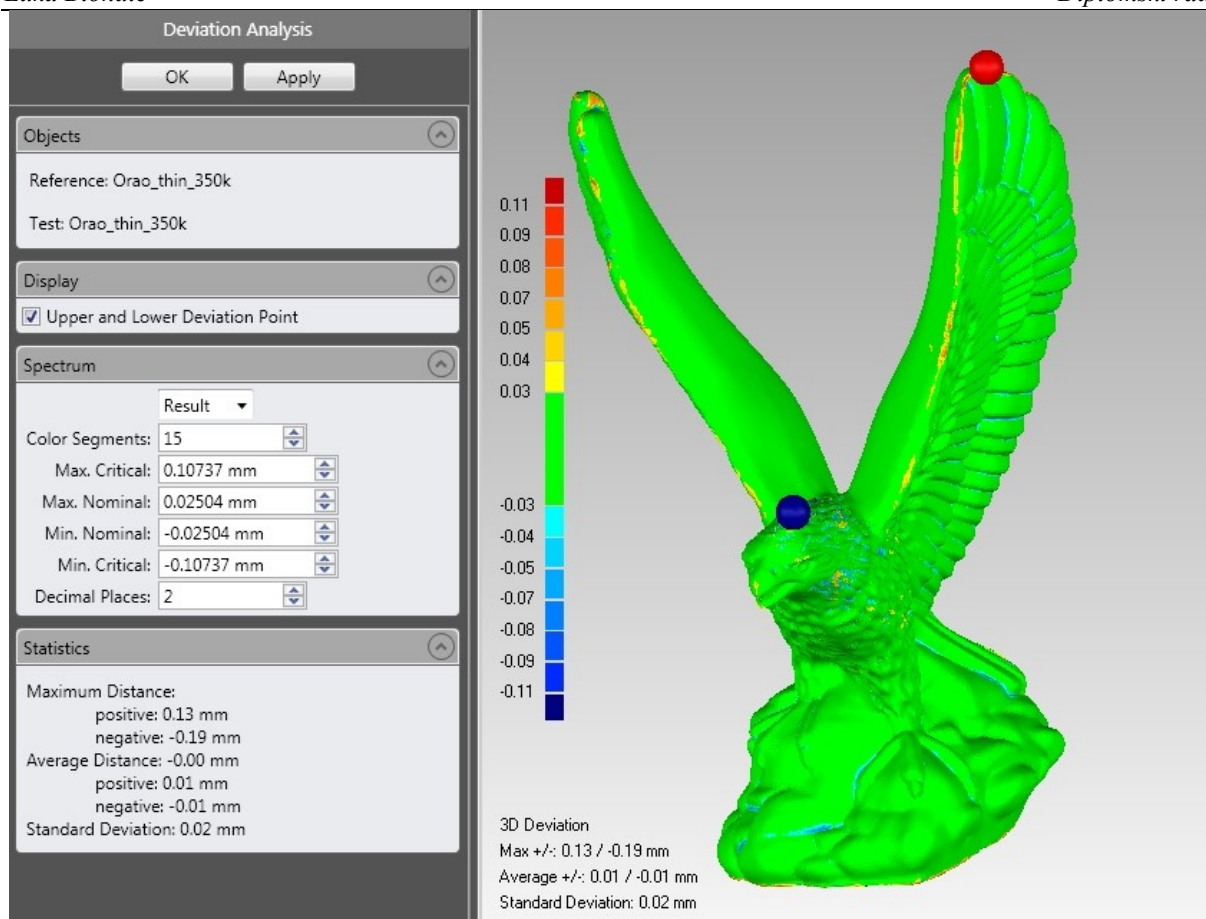
Na slici 14 crnom bojom su nacrtane granice NURBS-ova, dok je plavom bojom nacrtan Mash kontrolnih točaka koje će biti korištene pri postavljanju površine.

Zadnji korak je postavljanje površina prema generiranom Mash-u. U ovome koraku operater može odrediti "surface tension" ili "napetost površine" čime se definira duljina vektora površine  $G_2$  (Slika 11). Ovime je dana mogućnost da se model napravi oštiji ili zaobljeniji.



**Slika 15    Završeni CAD model sastavljen od NURBS površina**

Datoteke generirane ovakvim načinom su u konačnici velike i hardverski zahtjevne za računala, ali mogu se postići vrlo mala odstupanja od stvarne geometrije modela, te na vjeran način dobiti funkcionalan CAD model slobodne forme.



**Slika 16 Izmjera devijacija STL-a od CAD-a u GeoMagic softveru.**

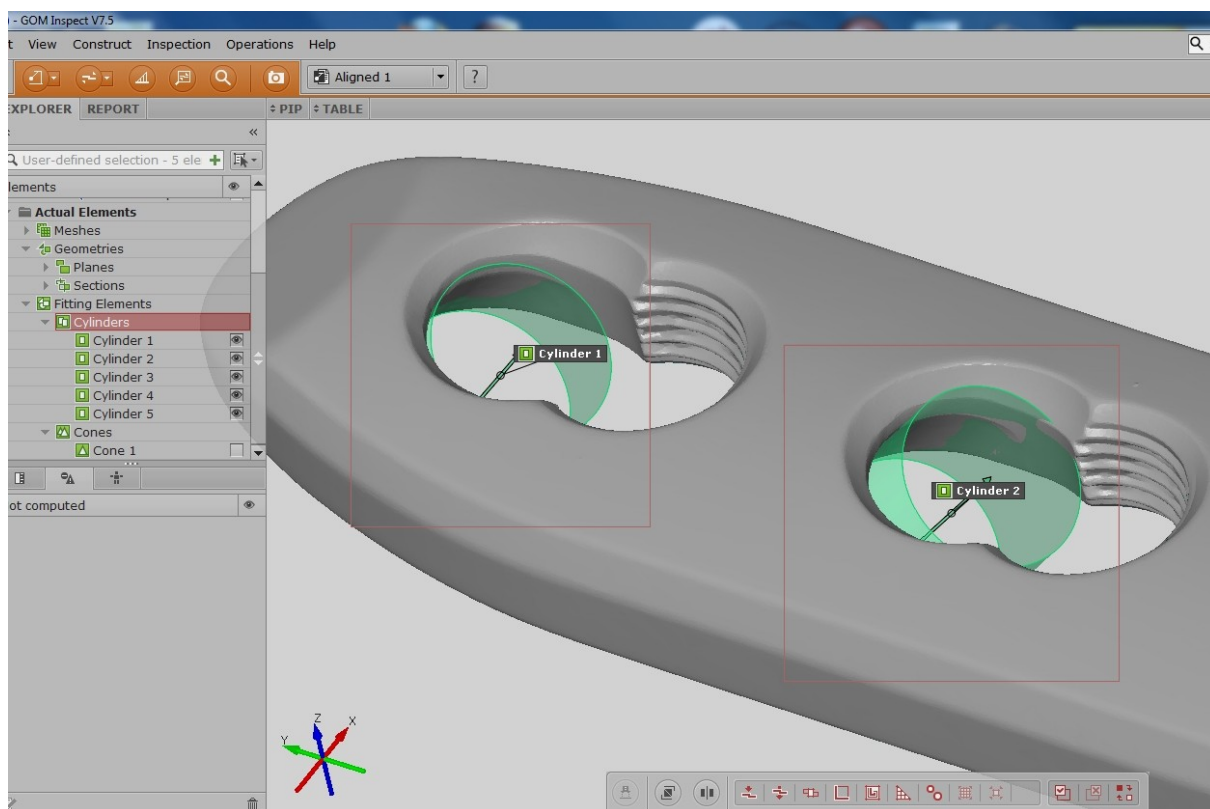
Kao što je vidljivo iz primjera na slici 16, NURBS površinama se bez problema dobivaju odstupanja od realne površine manja od 0,1 mm čak i kod geometrijski zahtjevnijih modela. GeoMagic pruža mogućnost analize odstupanja STL-a od CAD modela (Slika 16). Odstupanje se mjeri na način da se mjeri odstupanje svake kontrolne točke koja je poslužila za konstrukciju modela od projekcije te točke na površinu modela u smjeru normale na površinu.

### 3.3.2. Parametarski pristup

Parametarskim pristupom nastojimo rekonstruirati sve tehničke modele. Kako svaka realna geometrija odstupa od svoje zamišljene forme, na operateru je da zaključi koja je bila namjera konstruirane geometrije.

To znači da treba naći ravne dijelove modela i postaviti idealno ravne plohe na njih. Ako je model očito osnosimetričan onda ga treba napraviti osnosimetričnog makar odstupamo od skenirane geometrije. Uvijek treba paziti na paralelnost, okomitost, cilindričnost i slične geometrijske namjere koje možda nisu jasne iz samoga modela. U ovakvom načinu rada

mного ovisi o samom operateru i o njegovom općem strojarskom znanju i poznavanju tehnologija izrade modela.



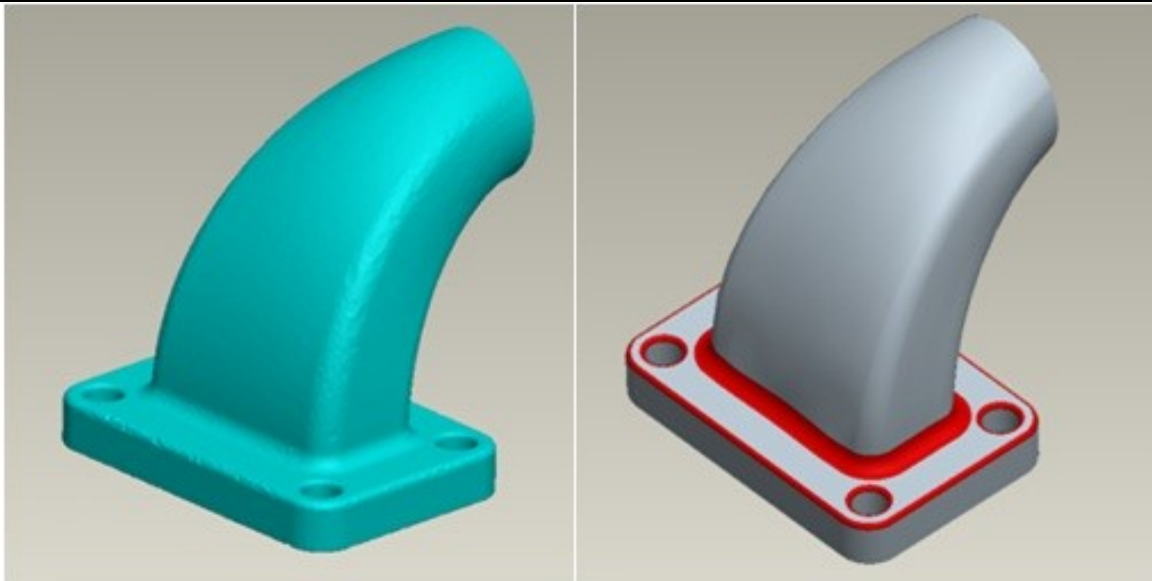
**Slika 17 "Best fit" postavljanje valjaka u Gom Inspect softveru**

Parametarskim pristupom namjera nam je zapravo napraviti geometrijski bolji model nego što nam je bio skenirani objekt.

GeoMagic i GOM Inspect softveri imaju mogućnost da pokušaju smjestiti geometrijska tijela u detalj Facet-a po "best fit" principu (Slika 17).

Međutim valja napomenuti da specijalizirani softveri kao GeoMagic iako korisni, nisu neophodni za parametarski pristup. U klasičnim CAD softverima se mogu konstruirati čiste geometrijske linije, dok se Facet koristi kao vizualna referenca.

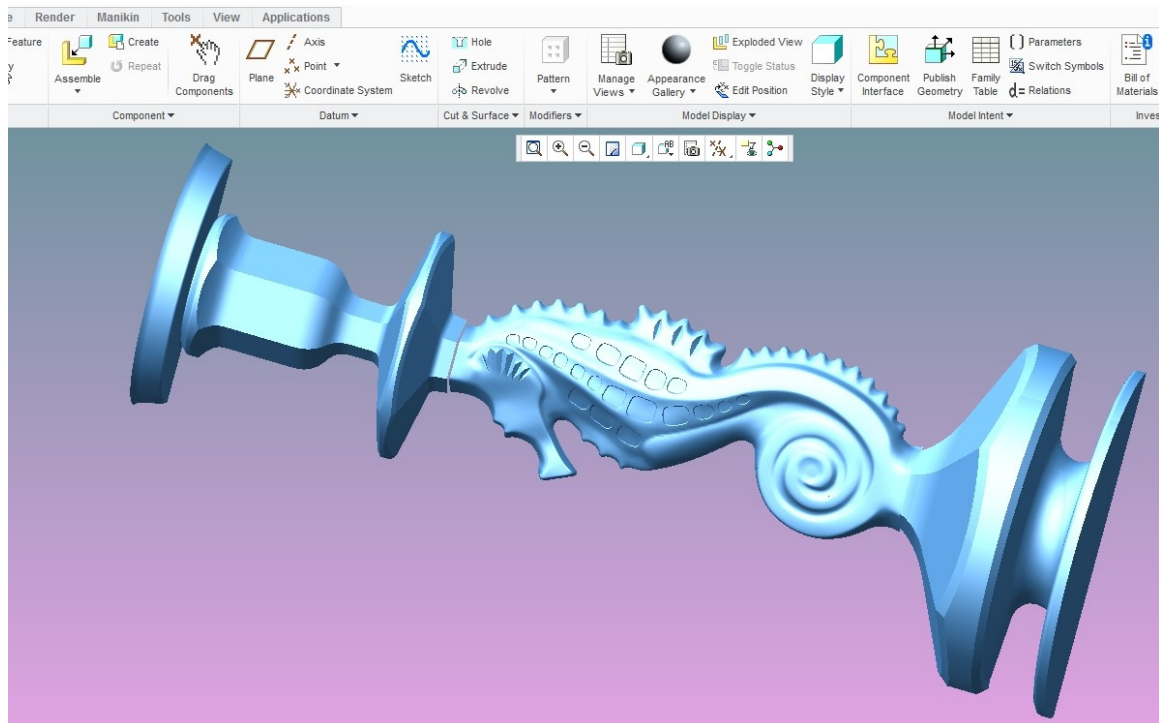




**Slika 18 Usporedba facet-a i parametarskog CAD modela**

### 3.3.3. Hibridni pristup

Hibridni pristup se primjenjuje na objektima koji imaju zone organske geometrije i zone tehničke geometrije. U tom slučaju odvojeno pristupamo rekonstrukciji dva dijela, jedan dio radimo parametarski, a drugi exact pristupom (Slika 19).

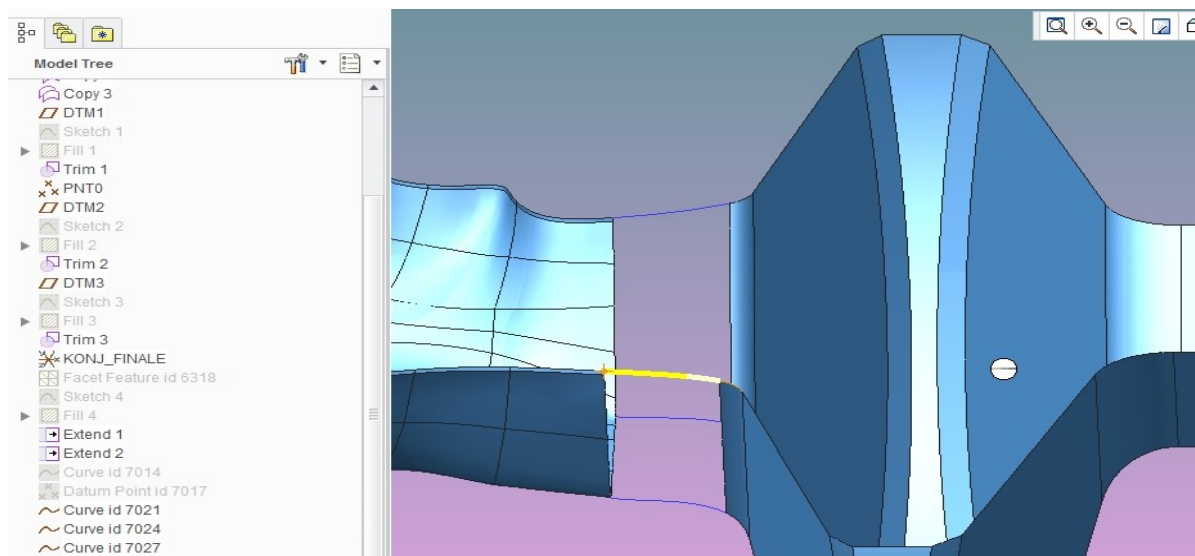


**Slika 19 Hibridni pristup rekonstrukciji površina**

Posebnu pažnju moramo obratiti na spoj tih dvaju dijelova, pošto se u takvim zonama isprepliću organske i čiste geometrijske forme. U takvoj zoni konturne linije konstruiramo



tako da se tangentno nastavljaju na NURBS geometriju i na parametarsku geometriju (Slika 20).



**Slika 20** Spajanje parametarskog i exact dijela u ProEngineer-u, posebno se pazi na tangentnost površina, da ne bi došlo do neželjenih rubova ili vrhova

## 4. POVRATNO INŽENJERSTVO U INDUSTRIJSKOJ PRAKSI

### 4.1. Rekonstrukcija oštećenih ljevačkih kalupa u cilju izrade novih

#### 4.1.1. Cilj projekta

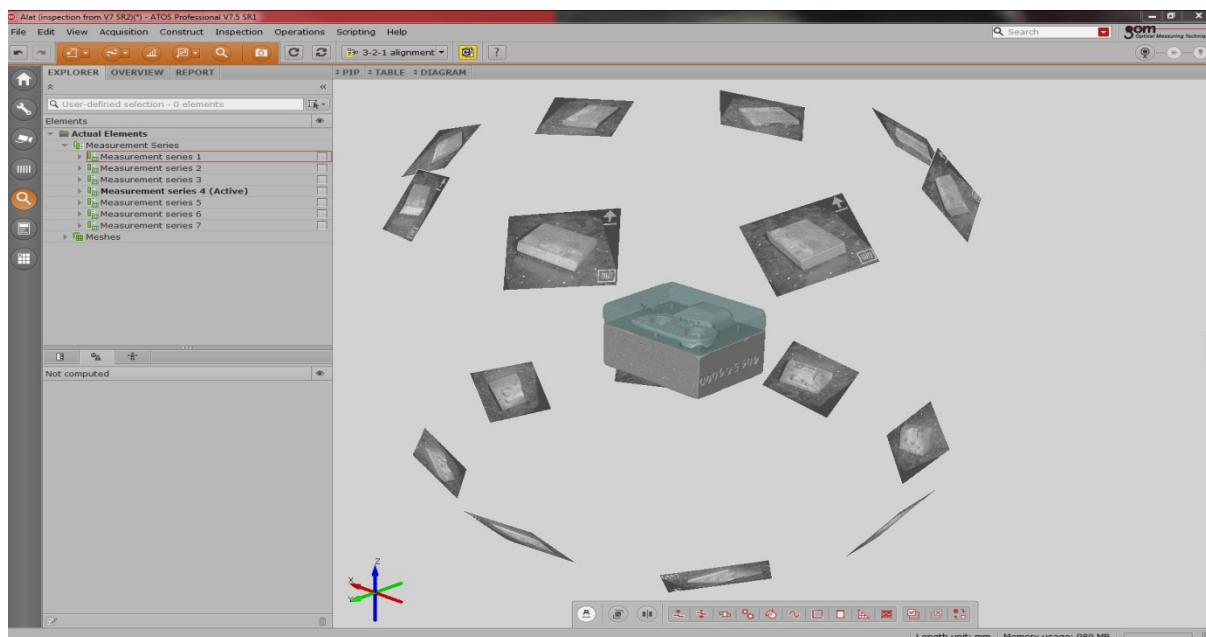
U ljevarstvu se često susrećemo sa kalupima koji su u uporabi 20-ak i više godina. Problem se javlja pri zamjeni postojećih istrošenih kalupa novima. Ako ne postoji CAD model kalupa izradi novog kalupa mora se pristupiti "kopiranjem" postojećeg uz popravljivanje i nadopunjavanje oštećenih i istrošenih dijelova. Cilj prikazanog projekta je napraviti CAD model dvodijelnog kalupa i jezgre (Slika 21).



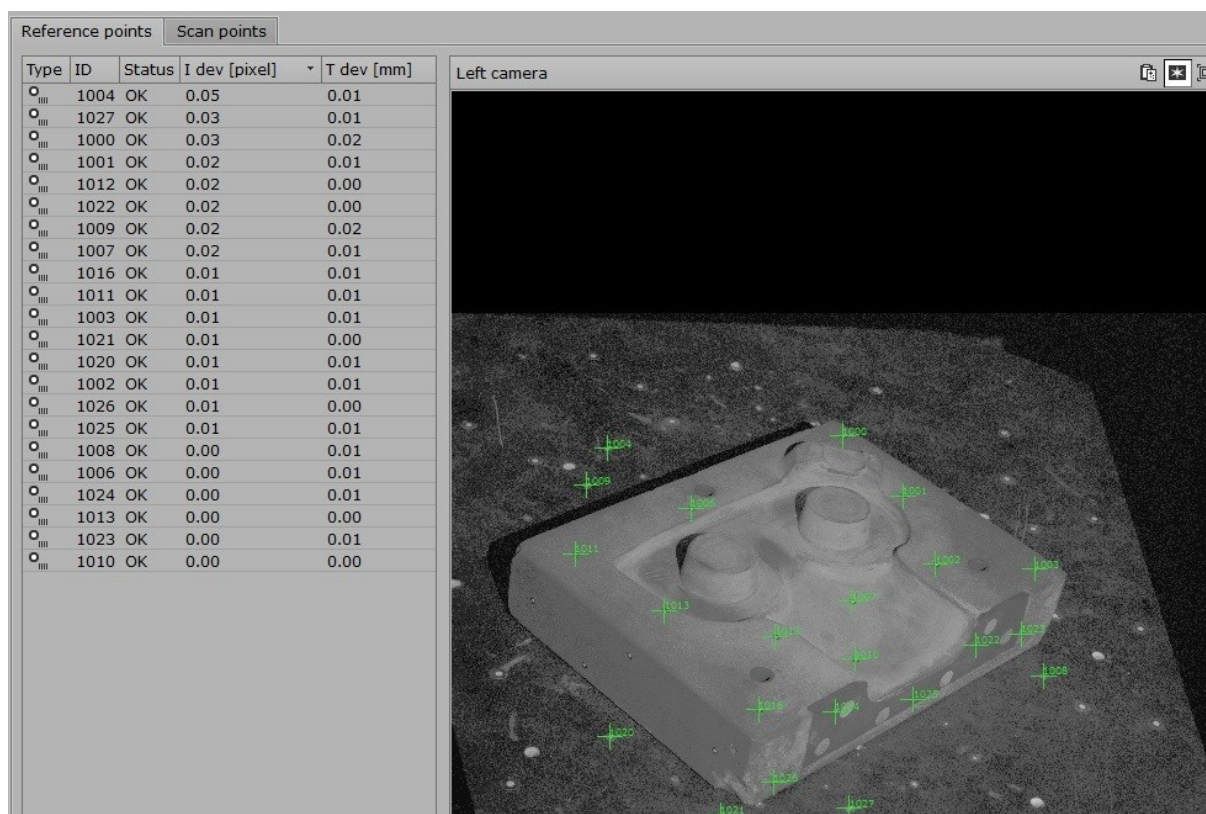
Slika 21 Fizički modeli koji treba rekonstruirati

#### 4.1.2.1. Optičko skeniranje objekta i obrada Facet-a

Kalup i jezgra su skenirani optičkim sustavom ATOS III Triple Scan (Slika 22i Slika 23) .



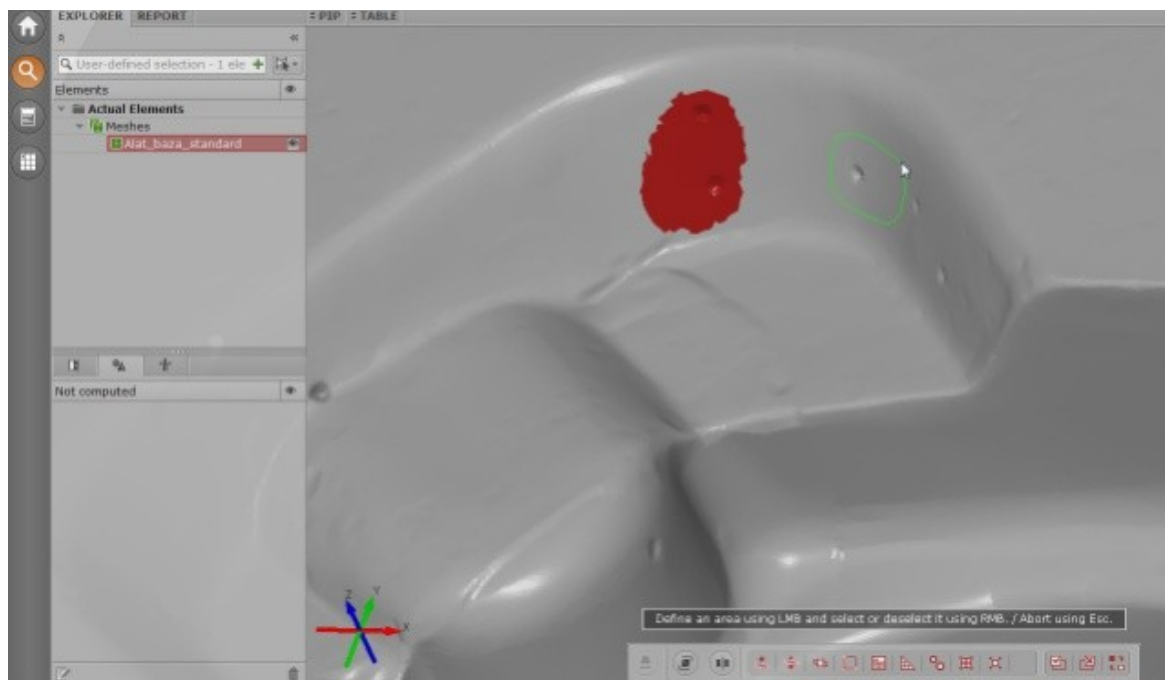
Slika 22 Prikaz skeniranog objekta i pozicija skeniranja



Slika 23 Pogled jedne od kamera i referentnih kontrolnih točaka

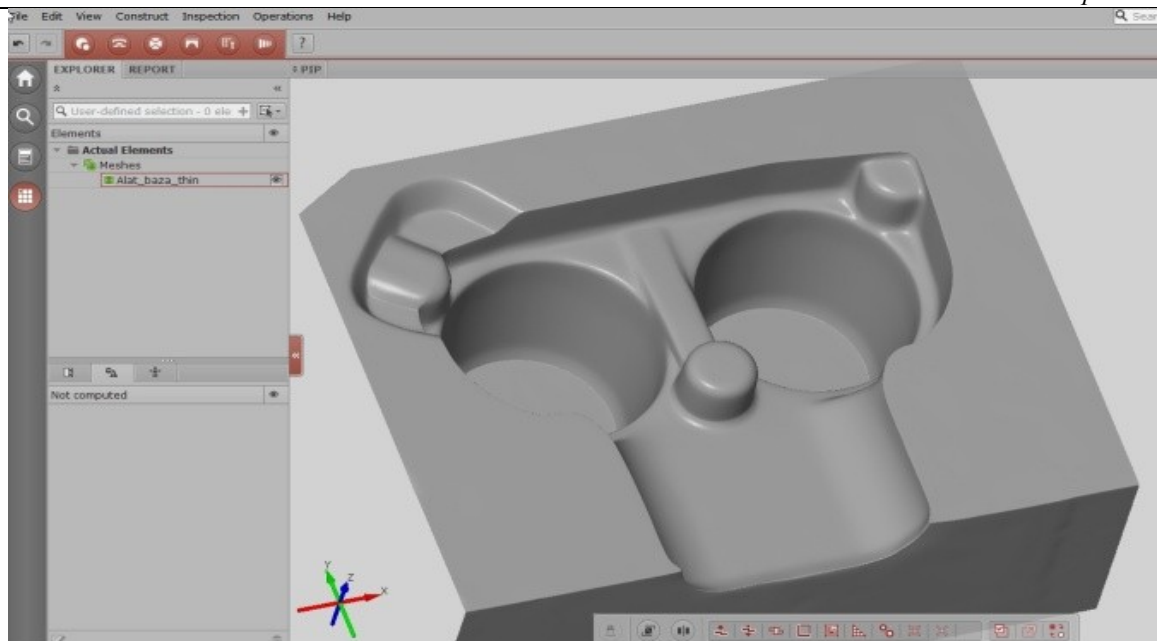
Na slici 23 je su vidljive maksimalne devijacije za svaku točku, te pozicija tih točaka. Vidljivo je da su sve devijacije unutar 0,02mm.

Dobiveni facet potom je obrađen u GOM inspect software-u kako bi se popravila gruba oštećenja i nedostaci (Slika 24). Poslije ove obrade model je zaglađen tako da se isprave sve neravnine koje su nastale dugogodišnjom uporabom.



**Slika 24 Popravak sitnih oštećenja STL file-a**

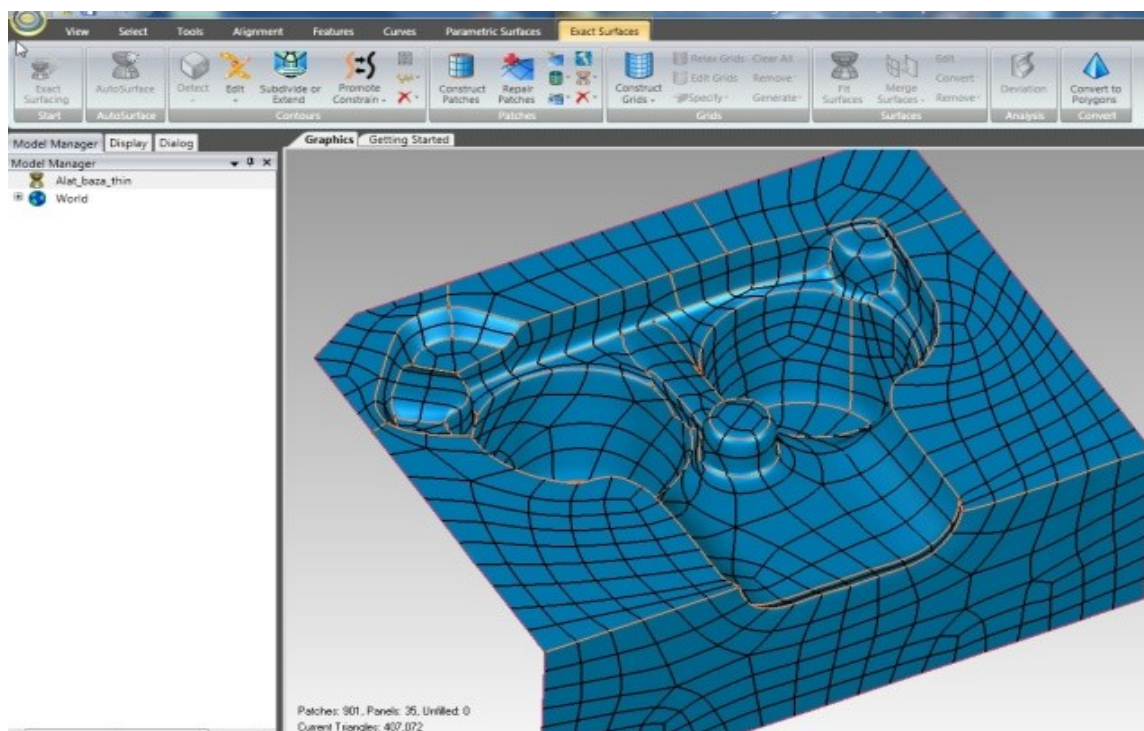
Slijedeći korak je rezanje okomitih stranica kalupa koje nisu bitne za samu geometriju odljevka. One će biti nanovo konstruirane na kraju projekta. Poslije ovog koraka dobivena je finalno uređena STL datoteka koja će nam poslužiti za rekonstrukciju geometrije "Exact" pristupom pomoću NURBS krivulja (Slika 25).



**Slika 25** Popravljen i zaglađena površina, spremna za daljnju obradu

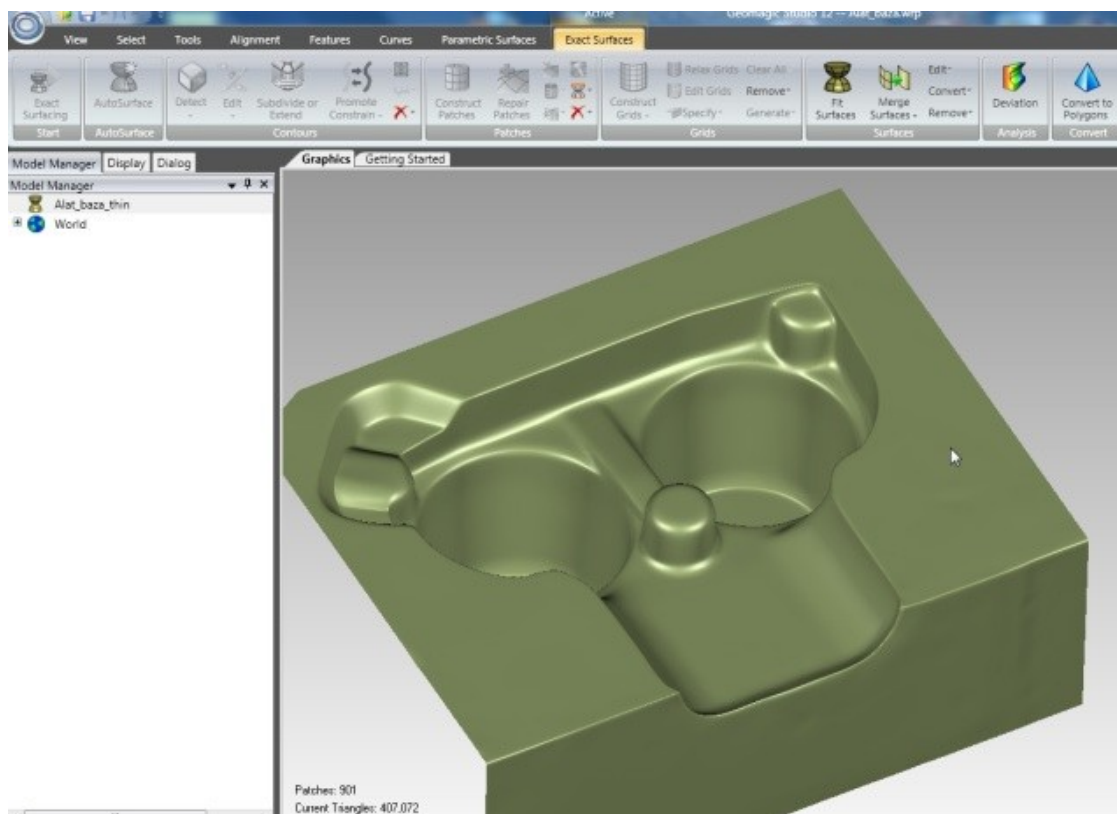
#### 4.1.3. Izrada CAD modela objekta

Izradi CAD modela se pristupilo se uz pomoć GeoMagic software-a. Na postojeću mrežu trokuta konstruirane su NURBS površine (Slika 26), od kojih je potom napravljen STP file postupkom koji je opisan u poglavlju 2.



**Slika 26** Konstruiranje NURBS površina u GeoMagic-u





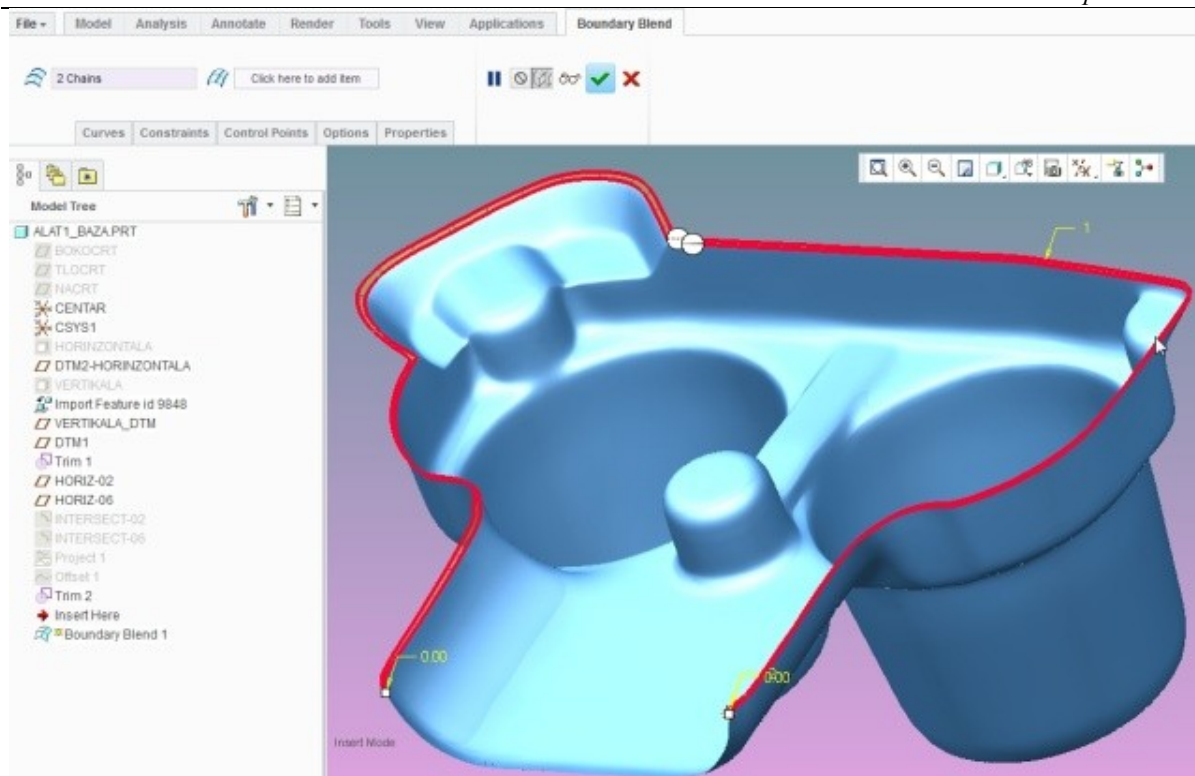
**Slika 27 STP model izrađen u GeoMagic-u**

#### **4.1.4. Popravak i nadopune CAD modela**

Kada je napravljen CAD model objekta, konstatirano je da je objekt potrošen uporabom i da bi ga trebalo obnoviti. Prvi zadatak je obnoviti razdjelnu površinu koja dijeli dva kalupa. Ona bi trebala biti identična tako da dijelovi kalupa budu u savršenom dosjedu. To na stvarnom modelu nije slučaj pošto je došlo do trošenja.

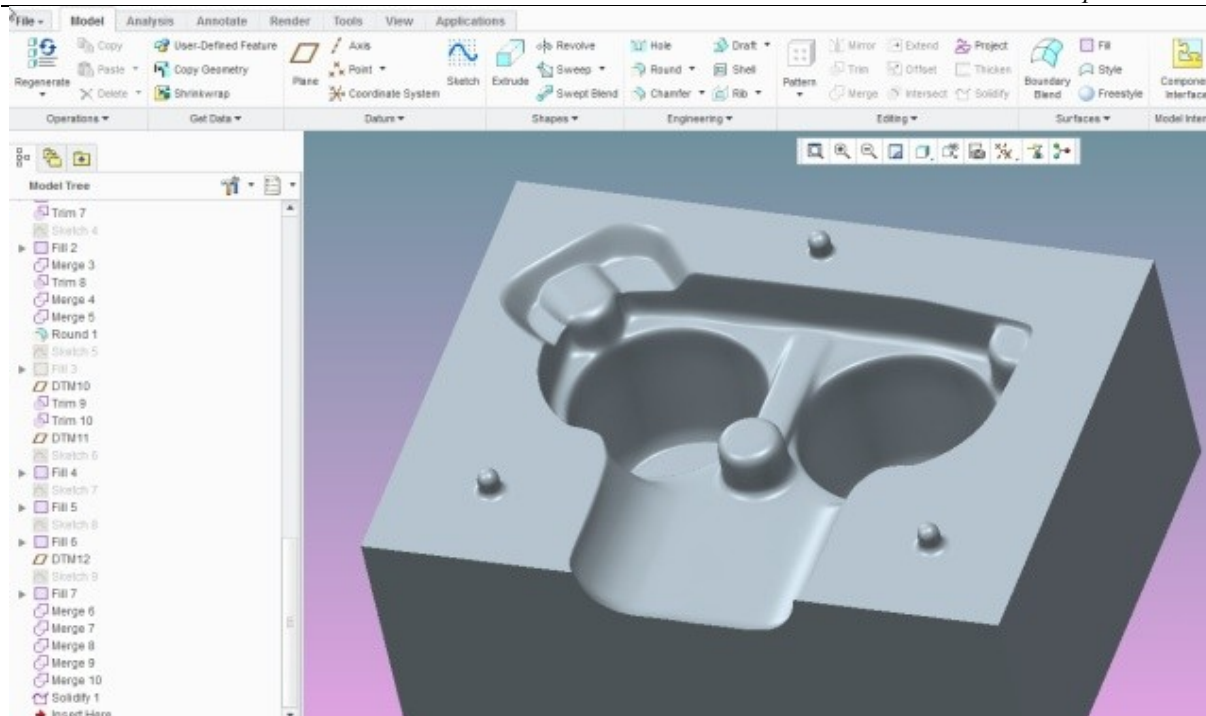
Drugi problem je uklanjanje srha do kojeg je došlo trošenjem brida koji dijeli razdjelnu površinu od geometrije odljevka.

Navedeni problemi su riješeni u ProEngineer software-u tako da je u potpunosti odrezana razdjelna površina, te napravljena nova geometrijski potpuno ravna (Slika 28).



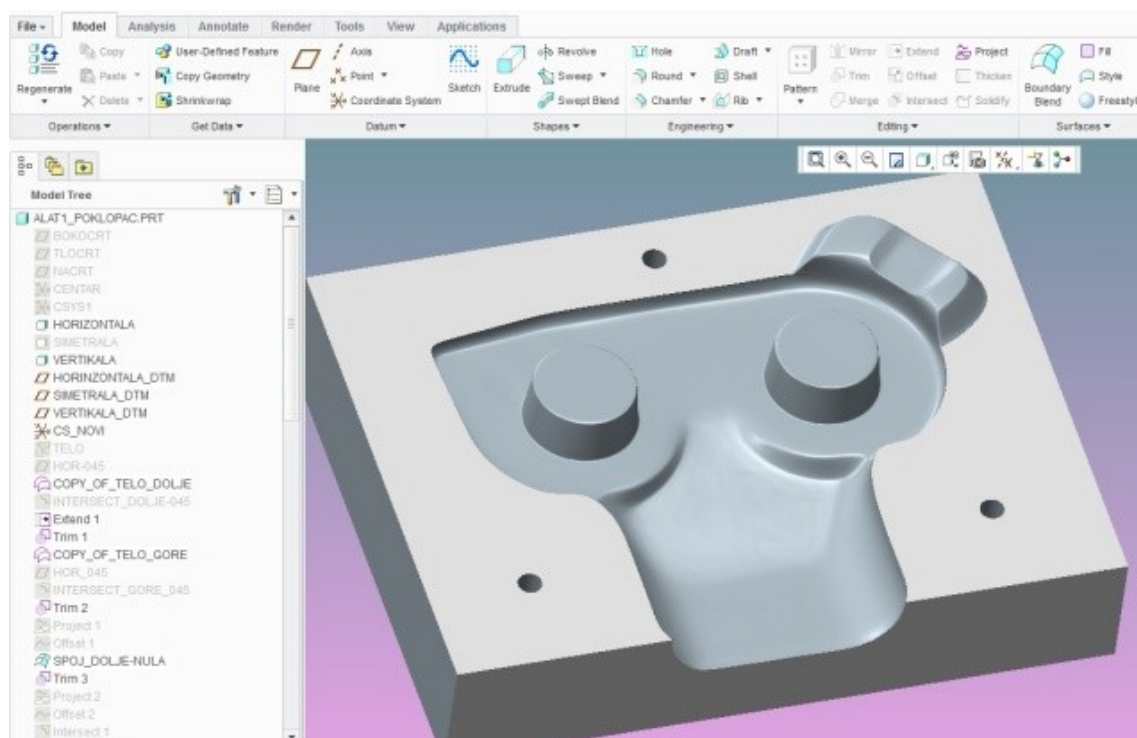
**Slika 28 Spajanje geometrije sa novom razdjelnom površinom**

Potom je nova razdjelna površina povezana sa geometrijom konstruiranom pomoću NURBS-ova na način da geometrija odljevka bude okomita na novu razdjelnu površinu. Na taj način je maksimalno sačuvana geometrija odljevka, maknut je srh i omogućeno je savršeno nalijeganje dva dijela kalupa. Potom je model finaliziran i dodani su osiguravajući zatici (Slika 29).



**Slika 29 Završeni model polovine kalupa**

Potom je isti postupak primijenjen na drugoj polovini kalupa (Slika 30), s tim da je upotrijebljena ista razdjelna površina koju smo koristili pri izradi prve polovice. Na taj način je postignuto savršeno poklapanje dva dijela kalupa.

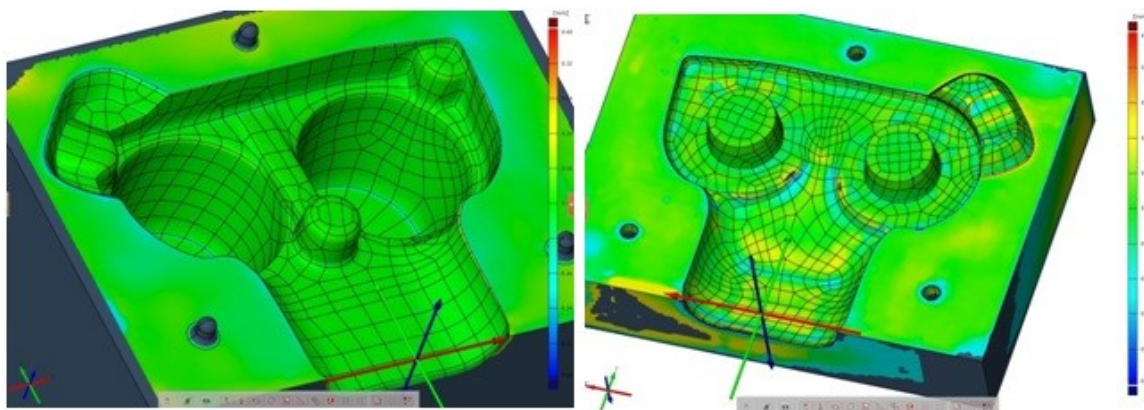


**Slika 30 Izrađen model druge polovine kalupa**



#### 4.1.5. Provjera rezultata

Mjerenje odstupanja CAD modela od STL mreže točaka napravljeno je u GOM Inspect softveru.



**Slika 31 Odstupanje STL-a od CAD modela**

Vidljivo je da je najveće odstupanje razdjelnoj liniji i prijelazu linije prema odljevku što je razumljivo pošto smo te dijelove bili najviše oštećeni te smo ih napravili iznova. Također odstupanja su vidljiva po kutovima pošto su tamo bila najveća oštećenja nastala korištenjem.

#### 4.1.6. Zaključak

Postupkom povratnog inženjerstva na navedenom ljevačkom kalupu napravljen je CAD model koji je iskoristiv u daljnjem procesu izrade kalupa. Odstupanja geometrije kalupa su ispod 0.1 mm, a svi nedostaci su ispravljeni, te nova površina glatka i bez oštećenja. Cijeli postupak rekonstrukcije trajao je dva radna dana te je u roku od tjedan dana novi kalup bio spreman za serijsku proizvodnju odljevaka. Cijeli ovaj postupak klasičnim načinom trajao bi znatno duže, a rezultati ne bi garantirali točnost u odnosu na stari odljevak.

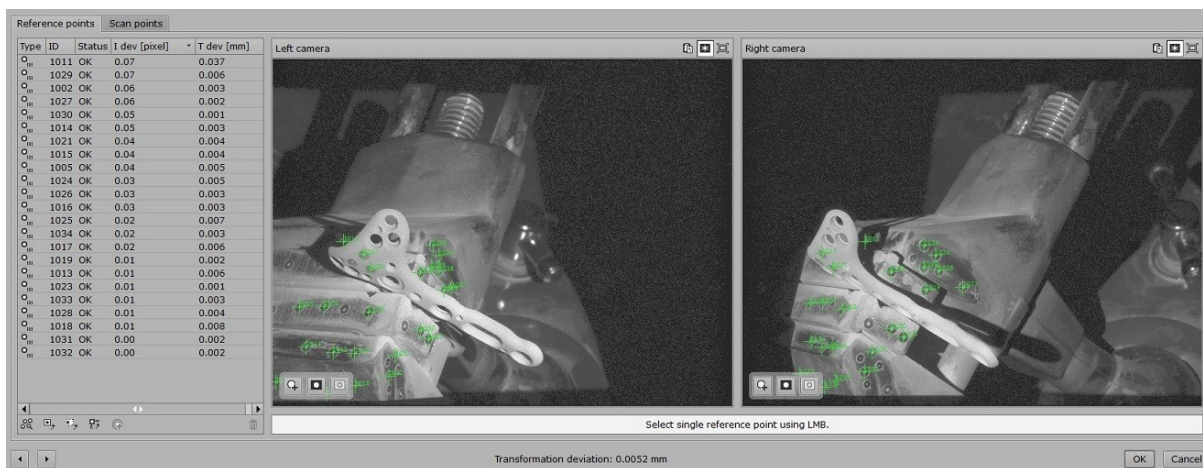
#### 4.1.7. Korištena oprema

- 3D digitalizacija: Optički skener Atos Triple Scan
- Popravak skenirane geometrije: Programski paket GOM Inspect
- Izrada CAD modela: Programski paket Gomagica
- Popravak CAD modela: Programski paket ProEngineer
- Provjera rezultata: Programski paket GOM Inspect

## 4.2. Izrada CAD modela kosti i medicinskih pločica

### 4.2.1. Cilj projekta

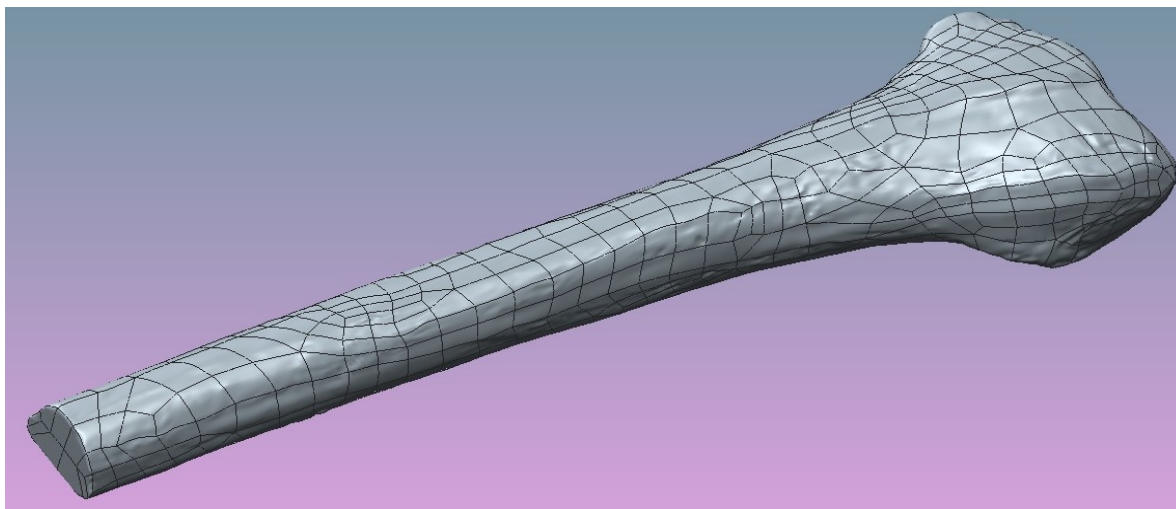
Potrebno je izraditi CAD model ljudske kosti, medicinske pločice koja služi za spajanje dva frakturirana dijela nadlaktične kosti (humerus), te vijaka koji spajaju kost i pločicu. Ova pločica je konstruirana za lom koji nastaje na nadlaktičnoj kosti na dijelu Namjena modela je da se metodom konačnih elementa analiziraju naprezanja u pločici i kosti, te prema rezultatima optimizira oblik slijedeće serije pločica.



Slika 32 Prikaz kontrolnih točaka i mjerna odstupanja

### 4.2.2. Izrada CAD modela kosti - "Exact" pristup

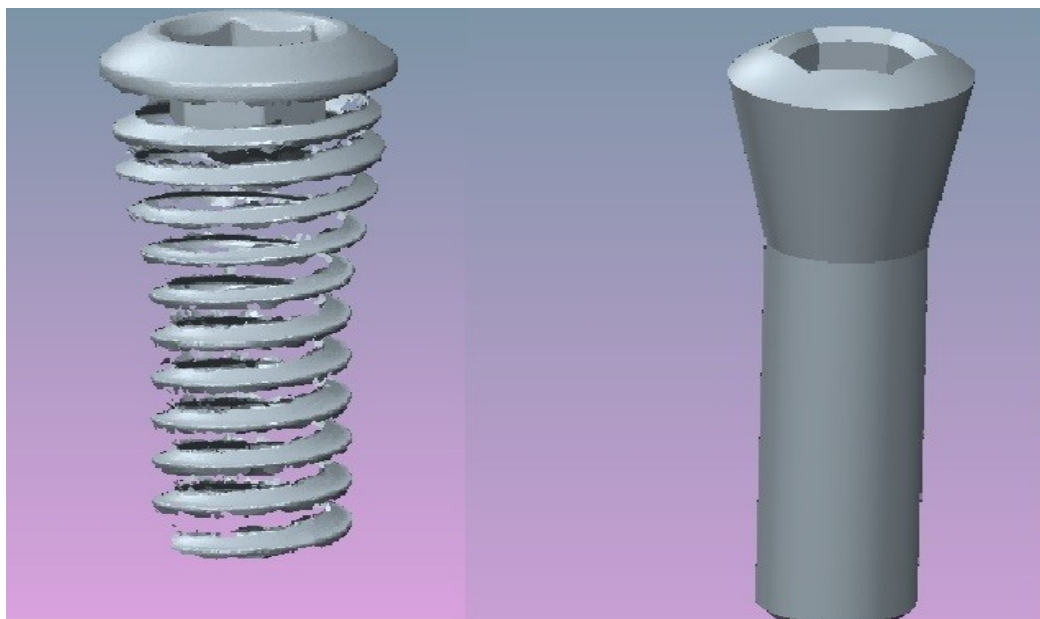
Kost je izrađena "Exact" pristupom kako je opisano u poglavlju 3.3.1. Pomoću 238 NURBS površina napravljen je realni model kosti (Slika 33).



Slika 33 CAD model ljudske podlaktice napravljen od NURBS površina

#### 4.2.3. Izrada CAD modela vijaka - "Parametric" pristup

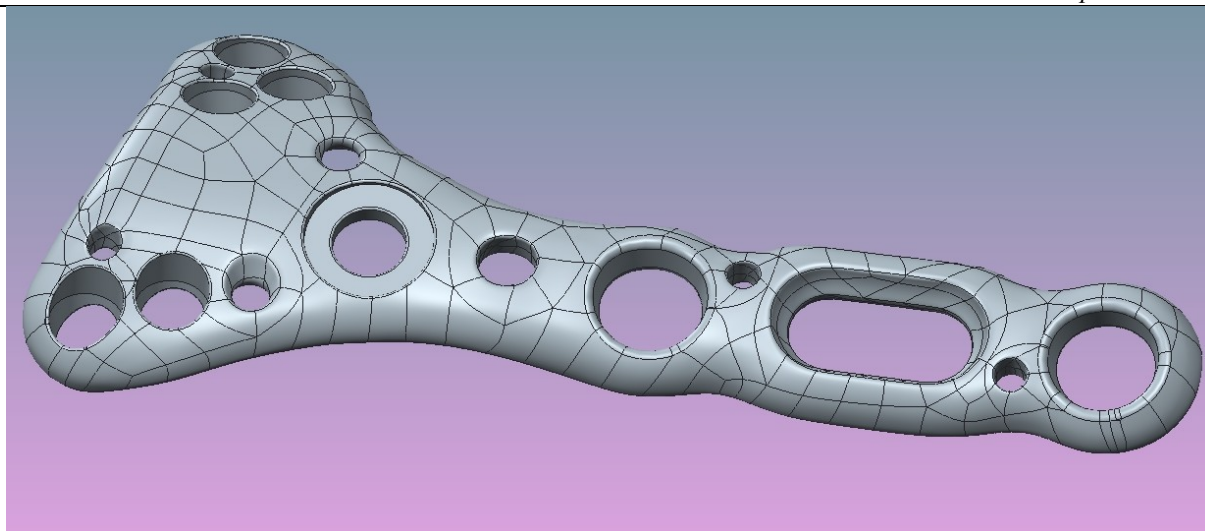
CAD model vijaka je napravljen klasičnim parametarskim pristupom u ProEngineer-u. Taj pristup je odabran zbog navoja. Navoji bi jako zakomplicirali postupak mash-iranja u softveru za konačne elemente, te bi sami rezultat bio vrlo neizvjestan. Zbog toga je u procesu spoj vijak-kost napravljen kao idealno nepomičan, a tijelo vijaka je aproksimirano valjcima (Slika 34). Sam "Facet" korišten je u postupku rekonstrukcije samo vizualno za geometrijske reference.



**Slika 34** Lijevo je prikaz skenirane geometrije, desno je aproksimacija vijka izrađena Parametric načinom

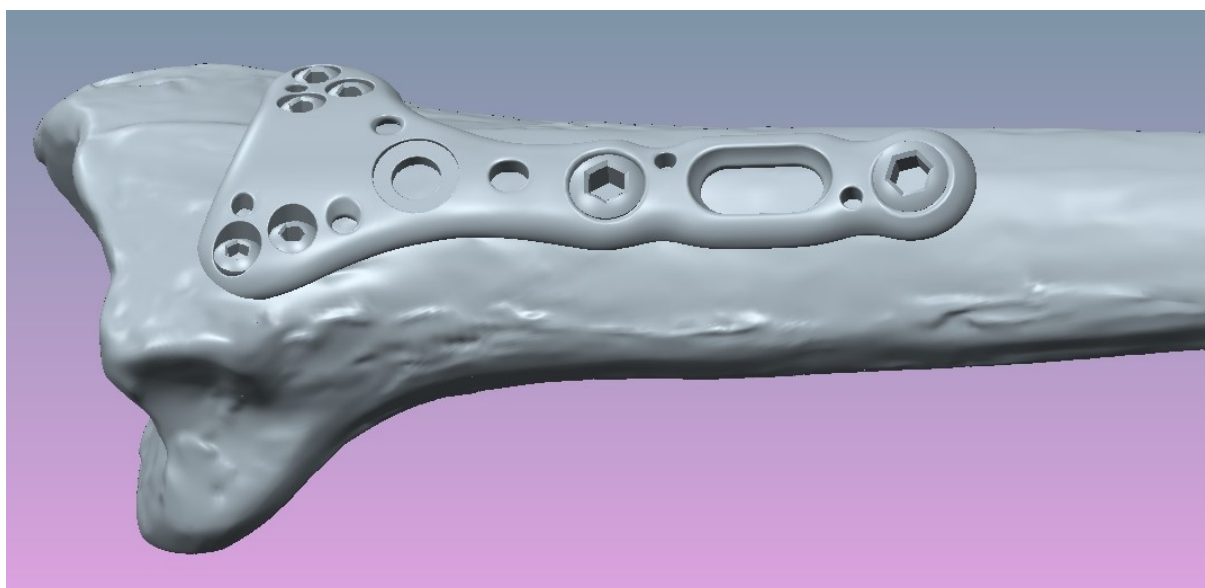
#### 4.2.4. Izrada CAD modela pločice - Hibridni pristup

CAD model pločice napravljen je kombiniranim pristupom. Prvo je STL model pripremljen na način da su izbrisane rupe za vijke, potom je vanjska forma napravljena kao "Exact" površina u GeoMagic softveru. Zatim je u ProEngineer-u ta površina presječena sa geometrijom vijaka da bi se dobile rupe za vijke. To je napravljeno u cilju dobivanja idealnog spoja između vijaka i same pločice. Sa takvim spojem nije bilo problema pri generiranju "Mash-a" za konačne elemente, te nije dolazilo do singulariteta naprezanja.



**Slika 35** CAD model pločice. Jasno su vidljive zone parametarskog i exact pristupa

#### 4.2.5. Finalizacija modela i zaključak



**Slika 36** Sklop pločice, vijaka i kosti

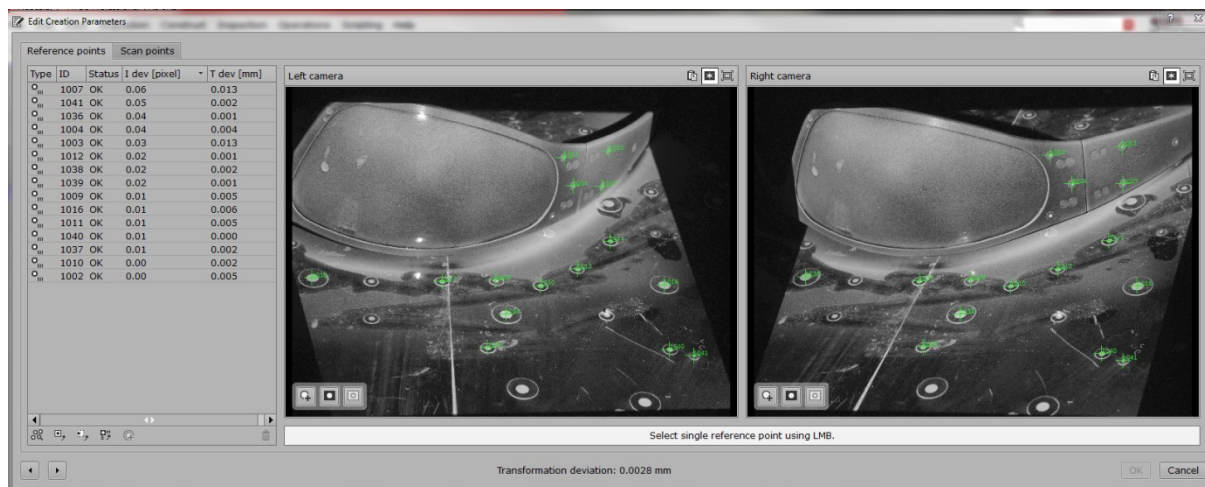
Sklop pločica, vijaka i kosti napravljen je u ProEngineer-u (Slika 36) i takav model je bio spreman za daljnju obradu metodom konačnih elemenata u Abacus softveru.

Na ovome primjeru objašnjeno je kako se različiti pristupi rekonstrukcije površina međusobno kombiniraju. Svaki pristup ima svoju namjenu, te se nadopunjuju ovisno o cilju. Spoj organske i tehničke geometrije obično se radi baš na ovakav način, kombinacijom "Exact" i parametarskog pristupa.

### 4.3. Izrada CAD modela sunčanih naočala i razvoj novog modela iz postojećeg

#### 4.3.1. Cilj projekta

Namjena je pokazati kako je razvoj novog proizvoda znatno lakši ukoliko se kao predložak uzme postojeći proizvod. Njegovim skeniranjem, rekonstrukcijom površina te analizom dolazi se do ideja za poboljšanje, te razradu novog proizvoda. Pošto su naočale proizvod koji je prilagođen fizionomiji korisnika, mora se izraditi nekoliko modela u ovisnosti o dimenzijama lica korisnika.

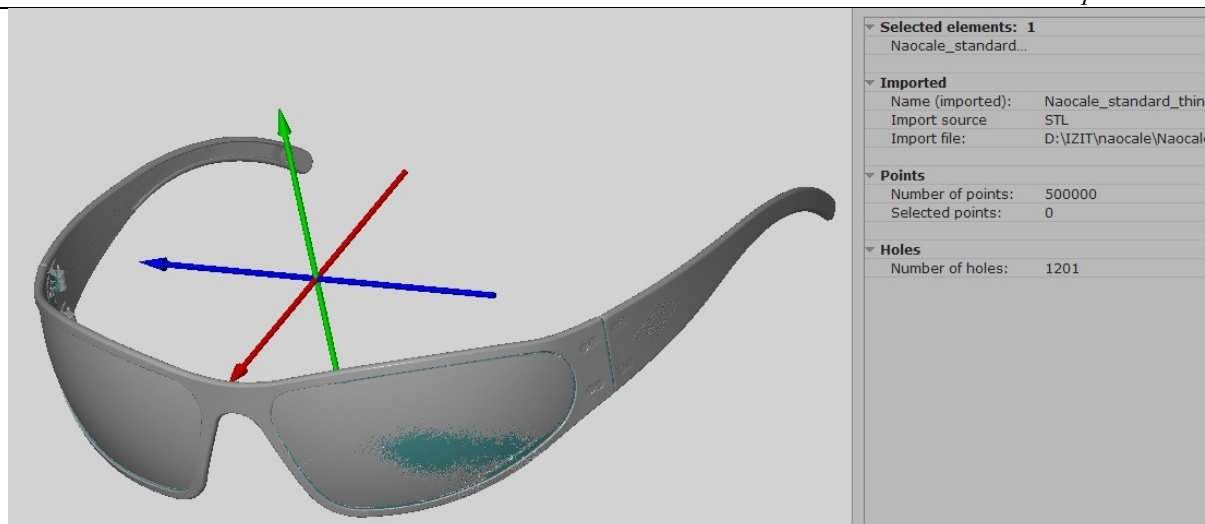


**Slika 37** Polovina naočala koju je iskorištena za povratno inženjerstvo, pogled iz lijeve i desne kamere

#### 4.3.2. Digitalizacija

Digitalizacija je napravljena sa Atos Triple Scan sustavom sa mjernim volumenom 100 mm (Slika 37). Kao rezultat digitalizacije dobiven je facet koji je softverski smanjen na 500 000 točaka (Slika 38).





**Slika 38** Prikaz facet-a naočala u GomInspect softveru

#### 4.3.3. Odabir načina rekonstrukcije

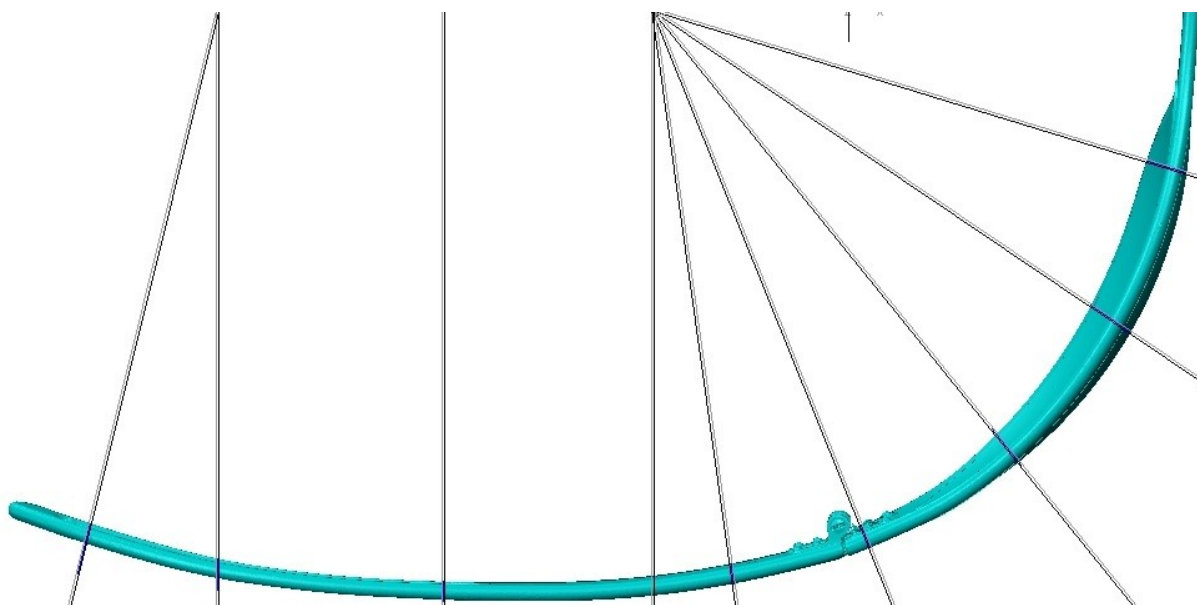
Ovaj model je relativno jednostavan i iako ima višestruko zakrivljene površine, ipak je tehnička forma. Zbog toga je odabrana parametarska rekonstrukcija kao najbolje rješenje. Odstupanja od originalnog modela će biti nešto veća nego kod "Exact" pristupa, ali ćemo imati veće mogućnosti manipuliranja modelom i jednostavniju razradu novih verzija proizvoda.

#### 4.3.4. Analiza formi i razdvajanje na podcjeline

Zbog kasnije serijske proizvodnje dijelovi proizvoda moraju rekonstruirani odvojeno, te nakon rekonstrukcije nanovo spojeni u jednu cjelinu. Pošto je proizvod simetričan, rekonstruirati ćemo samo jednu polovinu, te potom napraviti zrcalnu presliku dijelova. Takvim postupkom garantiramo simetričnost novog proizvoda.

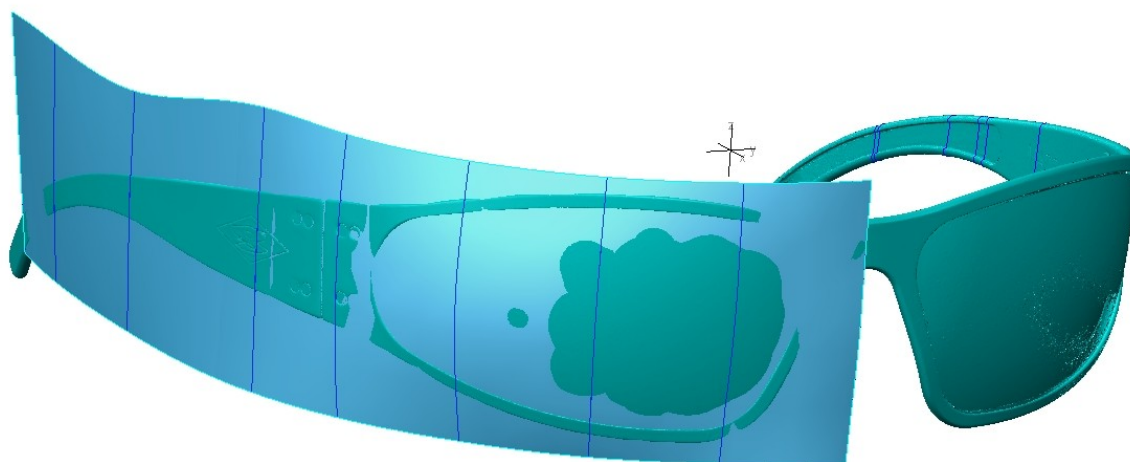
Kod zrcalno simetričnih objekata, treba napraviti vizualnu analizu i odabrati onaj koji ima manja fizička oštećenja i koji ima kvalitetniji STL file. U ovom slučaju to je desni dio. Sklop je podijeljen na dijelove: okvir, noga, staklo i šarke. Pošto su šarke standardni dio, one će biti samo vizualizacijski prikazane, bez detaljne razrade.

#### 4.3.5. Detaljni postupak Izrade CAD modela



**Slika 39** Facet naočala sa karakterističnim ravninama presjeka

Facet je iskorišten kako bi se njegovim presijecanjem po karakterističnim ravninama (Slika 39) dobili karakteristični presjeci pomoću kojih ćemo rekonstruirati dominirajuću površinu naočala. Svaki od dobivenih presjeka je "poliline" što je 2D ekvivalent facet-a. Takve linije presjeka su sastavljene od velikog broja točaka i dužina koje ih spajaju. Nijedna dužina nije tangentna na slijedeću, te bi površina napravljena od takvih linija bila puna bridova što znači hardverski zahtjevna i estetski neprihvatljiva. Zbog toga se koristeći vizualne reference presjeka konstruiraju geometrijski čisti i jednostavni polinomi (spline-ovi), te se njihovim spajanjem dobije glavna površina objekta (Slika 40). Kraj površine na koji će doći zrcaljeni lijevi dio naočala, napravljen je okomito na ravninu simetrale, da bi se izbjegao srh na spoju.



**Slika 40** Prikaz faceta, dominantnih presjeka, spline-ova i površine konstruirane iz njih

Nakon izrade površine, sličnom vizualnom metodom je nacrtan presjek okvira, te je ta skica projicirana na glavnu površinu. Sa tom projekcijom je odrezana površina, te potom "offset-irana" u smjeru normale na površinu prema unutarnjem dijelu naočala (Slika 41).



**Slika 41 Rad sa površinama u ProEngineer softveru**

Potom su rubovi zaglađeni, napravljen je utor za staklo, površine su zrcaljene, te model konvertiran u "solid model" da dobijemo podatke kao što je masa, centar mase, sile inercije i volumen.

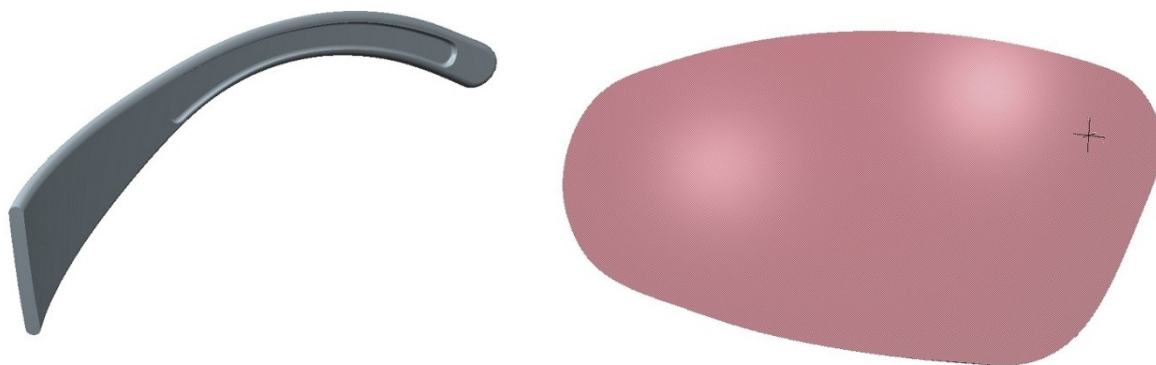


**Slika 42 Konačni model okvira naočala**

#### **4.3.6. Izrada ostalih CAD modela i spajanje u cjelinu**

Na način identičan opisan u prethodnom poglavlju izrađen je CAD model noge, te stakla (Slika 43).





**Slika 43 CAD modeli noge i stakla naočala**

Pri rekonstrukciji ovih dijelova korištena je ista glavna površina kao i za okvir. Na taj način osiguravamo tangentnost površina na okviru i nogama naočala.

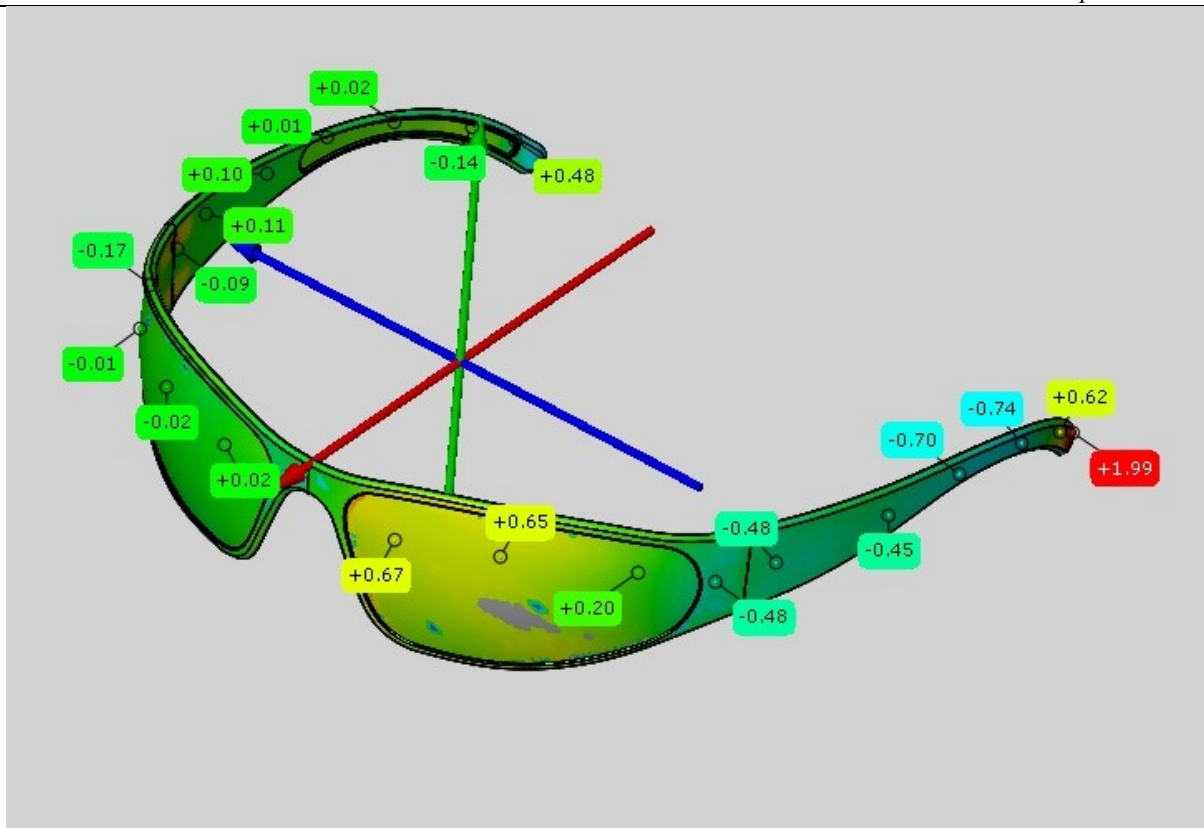


**Slika 44 Finalni model dobiven rekonstrukcijom površina naočala**

Na kraju je napravljen sklop modela koji će nam poslužiti za analizu odstupanja geometrija. Također ovaj model će poslužiti kao matrica za izradu serije sličnih modela naočala.

#### **4.3.7. Analiza odstupanja CAD modela od fizičkog modela**

Analiza odstupanja napravljena je u GOM Inspect softveru.



**Slika 45** Analiza odstupanja CAD modela od fizičkog modela

Zanimljivo je primijetiti da desna strana naočala koja nam je poslužila za rekonstrukciju modela odstupa najviše 0,15mm dok lijeva odstupa i preko 1 mm. Da se postupak rekonstrukcije radio na obadvije polovine, dobili bi vrlo nesimetričan objekt. U tome detalju se i krije najveća potencijalna opasnost i prednost povratnog inženjerstva. Nijedan fizički objekt se ne smije uzeti kao savršen i svakog treba pomno pregledati i po mogućnosti popraviti.

**Tablica 1 Usporedba odstupanja lijeve i desne polovice naočala**

Udaljenost po x-osi (mm)	Odstupanje CAD-a od objekta - desni dio (mm)	Odstupanje CAD-a od objekta - lijevi dio (mm)
2	+0,02	+0,67
10	-0,02	+0,65
25	-0,01	+0,20
40	-0,17	-0,48
55	-0,09	-0,48
70	+0,10	-0,45
90	-0,01	-0,70
120	-0,02	-0,74
140	-0,14	+0,62

#### 4.3.8. Modifikacije i izrada novog modela iz postojećeg

U ProEngineer softveru se s lakoćom modelira postojećim površinama i uz sitne modifikacije može se izraditi modificirani model prema osnovnom.

**Slika 46 Model naočala izrađen prema osnovnom**

## 5. ZAKLJUČAK

U digitalizaciji fizičkih modela optički skeneri su postali nezamjenjiv alat. Njihovim razvojem i usavršavanjem kroz par faza, dovedeni su do faze gdje se istim skenerom bez poteškoća i u kratkom vremenu mogu digitalizirati objekti veličine šibice do broda. Rezultati digitalizacije su STL datoteke koje se direktno mogu koristiti u CNC alatima. Međutim svi fizički modeli u sebi nose nesavršenosti oblika. Te nesavršenosti nastaju zbog niza razloga kao što su nesavršenost samog procesa izrade, oštećenja uslijed uporabe, termodinamičkih deformacija i nesavršenosti samog procesa skeniranja. Sa STL datotekama je vrlo teško upravljati, pa je zbog toga preporučljivo predmet dodatno obraditi u CAD programskim aplikacijama. Ta obrada se može napraviti na dva različita načina. Jedan je softverskim smanjivanjem očite greške STL datoteke i najkvalitetnijom mogućom izradom klasične CAD datoteke. Drugi način je da STL datoteke služi kao "predložak" po kojem izrađujemo CAD model klasičnim softverskim paketima poput Catia-e, ProEngineer-a ili SolidWorks-a. Ovakav pristup zahtijeva veću vještinu operatera, te izvjesno strojarsko znanje CAM procesa. Rezultati dobiveni ovakvim načinom obično više odstupaju od fizičkog objekta, ali su forme jednostavnije, čišće i slijedom toga jednostavnije za kasnije korištenje. Ako operater zna prepoznati na koji način je došlo do greške, ovo je put kojim se ona može smanjiti ili eliminirati.

U poslu osiguranja kvalitete, 3D skeniranje je već preuzelo kontrolu gotovih proizvoda. To uključuje kontrolu odstupanja dimenzija i geometrijskih tolerancija.

Povratno inženjerstvo s upotrebom 3D skenera pruža mogućnosti modificiranja postojećeg i izradu novog proizvoda. Razvojem novih tehnologija skeniranja i novih skenera, ovaj proces teći će još brže i lakše, te će skeneri istisnuti kontaktne mjerne uređaje, koji će se ipak zadržati u poljima gdje su potrebne najveće mjerne preciznosti.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**

## **LITERATURA**

- [1] IZIT d.o.o.- baza projekata firme
- [2] TOPOMATIKA d.o.o.-baza projekata firme
- [3] Nenad Drvar dr. sc. stroj. : Doktorski rad - Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla, FSB Zagreb 2007
- [4] Josip Kos mag. ing. mech.. : Diplomski rad - Trokoordinatno mjerenje trošenja polimernih zupčanika
- [5] Luka Biondić : Povratnim inženjerstvom do ispravnih odljevaka , Časopis IRT, srpanj 2012.
- [6] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [7] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.